

30-0067/002

STB-7367

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Baustoffuntersuchungen an Spannbetonbauwerken
zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von
Spannstählen

von

J. Erdmann

J. Neisecke

F.S. Rostásy

Braunschweig, 1982

87.231

Das Forschungsvorhaben wurde unter dem Aktenzeichen IV/1-5-134/77
vom Institut für Bautechnik, Berlin, gefördert.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenstellung der Bauwerke, aus denen Proben entnommen wurden	3
1. Allgemeines	4
2. Problemstellung und Ziel der Forschungsaufgabe	4
3. Durchführung der Forschungsaufgabe	6
4. Untersuchungen und Ergebnisse	10
4.1 Ruhrbrücke bei Herdecke	10
4.2 Leinebrücke bei Olxheim	28
4.3 Brücke über die Sagter-Ems bei Friesoythe	40
4.4 Brücke OL 51, BAB-A28 bei Oldenburg	57
4.5 BAB-Rheinbrücke bei Köln-Rodenkirchen	71
4.6 Überführung B477/BAB-A57 bei Neuß	77
4.7 Herrenbrücke in Lübeck	94
4.8 Überführung Belmer-Straße/BAB-A33 in Osnabrück	107
5. Zusammenfassung	119

Bauwerk	Konstruktionsprinzip	Bau-jahr	Abbruch bzw. Untersuchung	Spannstahl	Spannverfahren
Ruhrbrücke bei Herdecke	Durchlaufendes Plattenkreuzwerk, längs vorgespannt	1950	1980	St 1420/1620 rund, glatt, \varnothing 5 mm	Freyssinet-Wayss u. Freytag
Leinebrücke bei Olixheim	Trägerrost mit Längsvorspannung	1952	1979	St 1420/1620 rund, glatt, \varnothing 5 mm	n.n.
Brücke über die Sagter Ems bei Friesoythe	Plattenbalken mit Längsvorspannung	1953	1978	Sigma-oval 20, gerippt St 1420/1620	Monierbau
Brücke OL 51, BAB-A28 bei Oldenburg	Plattenbrücke längs und quer vorgespannt	1953	1978	St 1420/1620 rund, glatt, \varnothing 5,2 mm	Freyssinet-Wayss und Freytag
BAB-Rheinbrücke bei Köln-Rodenkirchen	Längs- und quer vorgespannte, fugenlose Fahrbahnplatte	1955	1977	St 780/1030 rund, glatt, \varnothing 26 mm	D und W
Überführung B477/BAB-A57 bei Neuß	Hohlkastenbrücke längs vorgespannt	1957	1978	Sigma St 1320/1470 rund, glatt, \varnothing 8 mm	Freyssinet
Herrenbrücke in Lübeck	Plattenbalken längs und quer vorgespannt	1963	1978	Sigma St 1230/1370 rund, glatt, \varnothing 12,2 mm	SAWÖ
Überführung der Belmer-Straße/ BAB-A33 in Osnabrück	Längs vorgespannter Plattenbalken	1965	1980	St 1470/1670 rund, glatt, \varnothing 6 mm	BBRV 116

Zusammenstellung der Bauwerke, aus denen Proben entnommen wurden.

1. Allgemeines

Seit 1977 wurde von der EGKS und dem IfBt, Berlin, ein Forschungsprogramm zum Thema "Korrosion von Spannstählen" gemeinsam gefördert, an dem sich die Universitäten Erlangen (Prof. Kaesche), Stuttgart (Prof. Rehm), Braunschweig (Prof. Kordina/Prof. Rostásy), das MPI Düsseldorf (Prof. Engell), die BAM Berlin (Dr. Stichel) sowie die Fa. Krupp (Dr. Stolte) beteiligten. Im Rahmen dieses Programms wurden am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, die Forschungsvorhaben "Auswertung von vorhandenen und zukünftigen Berichten über Abbrucharbeiten von Spannbetonbauwerken im Hinblick auf das Langzeitverhalten von Spannstählen" (Prof. Kordina) und "Baustoffuntersuchungen an abzubrechenden Spannbetonbauwerken zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von Spannstählen" (Prof. Rostásy) bearbeitet. Im Gegensatz zu den übrigen Forschungsvorhaben des Gesamtprogramms wurden diese beiden Forschungsvorhaben ausschließlich aus Mitteln des Instituts für Bautechnik, Berlin gefördert. Der hier vorgelegte Schlußbericht befaßt sich mit den Untersuchungen und Ergebnissen des Forschungsvorhabens "Baustoffuntersuchungen an abzubrechenden Spannbetonbauwerken zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von Spannstählen."

2. Problemstellung und Durchführung der Forschungsaufgabe

Erkenntnisse und Informationen über das Langzeitverhalten von Spannstählen - abgesichert durch Versuchsergebnisse aus Schadensfällen oder Abbrüchen älterer Spannbetonbauwerke - liegen bisher nur sehr spärlich vor. Zusammenfassende Darstellungen wie U. Nürnberger "Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen", erschienen 1980 in Heft 308 der Schriftenreihe Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, müssen daher zur Zeit noch als Ausnahmen angesehen werden. Während im Rahmen von Schadensfällen im Interesse der Schadensursachenfindung meistens sehr sorgfältige Baustoffanalysen durchgeführt werden - wie aus

vorstehendem Literaturzitat deutlich hervorgeht -, trifft dies auf die Abbrüche alter Spannbetonbauwerke in der Vergangenheit leider nicht zu. Dieser Sachverhalt ist insofern auch nicht verwunderlich, da beispielsweise im Merkblatt (1974) "Untersuchungen an abzubrechenden Massivbrücken und massiven Teilen von Stahl-Verbundträgerbrücken" des Bundesministers für Verkehr den Fragen nach dem Zustand des Spannstahls nur Untersuchungsstufe B ("Sonstige Untersuchung") und C ("Untersuchung, die nur in Ausnahmefällen in Betracht kommt") zugemessen wird. Lediglich dem Korrosionsgrad und der Umhüllung der Spannstähle mit Verpreßmörtel wird mit Untersuchungsstufe A ("Untersuchung von besonderem Interesse") die erforderliche Aufmerksamkeit geschenkt. Diese unterschiedliche Wertung führt dann im Hinblick auf das Langzeitverhalten von Spannstählen letztendlich zur Ermittlung nicht weiter verwert- und auswertbarer Daten. Korrosionsgrad und Umhüllung der Spannstähle bleiben ohne Wert, wenn nicht gleichzeitig die Auswirkungen auf die mechanisch-technologischen Kennwerte des Stahls einschließlich Dauerschwingfestigkeit und Restvorspannung (alle Untersuchungsgrad C) ermittelt werden.

Diese Situation hat sich glücklicherweise in den letzten Jahren geändert. Der Bundesminister für Verkehr hat Untersuchungen hinsichtlich des Langzeitverhaltens von Spannstählen bei Brückenabbrüchen auf Antrag verstärkt gefördert und die Erkenntnis, welche Bedeutung derartige Untersuchungen für die Sicherheit und Dauerhaftigkeit von Spannbetonkonstruktionen haben, hat letztendlich auch zur Förderung des hier vorgelegten Forschungsvorhabens geführt. Wegen der für diese Forschungsaufgabe vergleichsweise nur spärlich vorhandenen Forschungsmittel und in Kenntnis der hohen Versuchskosten wurde der forschenden Stelle auferlegt, Untersuchungen möglichst nur an abzubrechenden Bauwerken durchzuführen, bei denen die Probenentnahme weitestgehend durch Unterstützung der den Abbruch veranlassenden Straßenbauämter - und damit kostenlos - erfolgen konnte, so daß die Forschungsmittel in erster Linie für Laboruntersuchungen und Berichterstattung zur Verfügung standen.

Wegen der knappen Mittel war daher zunächst die Untersuchung an nur drei abzubrechenden Bauwerken geplant. In die Untersuchung und Auswertung wurden jedoch zur Vervollständigung des Berichtes zusätzlich auch Ergebnisse von Schadensanalysen übernommen und eingearbeitet, die im Bearbeitungszeitraum bei der forschenden Stelle anfielen und das Thema "Langzeitverhalten von Spannstählen" betrafen. Auf diese Weise kann über den Zustand von Spannstählen aus insgesamt 8 alten Spannbetonbauwerken berichtet werden. Ziel der Untersuchungen und Auswertungen sollte es dabei jeweils sein, die Umgebungsbedingungen der Stähle im Bauwerk und deren Auswirkungen auf Korrosionszustand, mechanisch-technologische Kennwerte und - wenn möglich - Restvorspannung festzustellen. Die Untersuchungen erstreckten sich im einzelnen auf den Spannstahl, den Verpreßmörtel, das Hüllrohr und den umgebenden Beton, so daß Aussagen über das Langzeitverhalten der Spannstähle unter den jeweils vorgefundenen Umgebungsbedingungen möglich waren.

3. Durchführung der Forschungsaufgabe

Im ersten Bearbeitungsabschnitt der Forschungsaufgabe war es erforderlich, Kenntnisse und eine Übersicht über die im Bearbeitungszeitraum zum Abbruch anstehenden Spannbeton-Bauwerke zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurden Kontakte mit Landesministerien, Baubehörden, Straßenbauverwaltungen und Bauunternehmungen hergestellt, wobei insgesamt 12 Bauwerke in Erfahrung gebracht wurden, deren Abbruch für das Forschungsvorhaben voraussichtlich verwertbare Ergebnisse liefern würde. Tatsächlich konnte dann nur aus 4 Bauwerken Probenmaterial für Laboruntersuchungen entnommen werden. Bei den übrigen Bauwerken wurden entweder die Abbrüche auf spätere Zeitpunkte verschoben oder aber eine Probenentnahme war wegen großer Entfernungen und technischer Schwierigkeiten mit den zur Verfügung gestellten Mitteln nicht möglich. Besonders erschwerend war, daß häufig gar keine Zeit zur Probenentnahme bereitgestellt werden konnte, da zwischen Sperrung des Bauwerks und seiner Sprengung einschließlich Beseitigung der Trümmer nur Stunden lagen.

Der zweite Bearbeitungsschritt diente dann in erster Linie der Probenbeschaffung aus abzubrechenden bzw. gerade abgebrochenen Bauwerken. In der Regel war die Probenentnahme nur durch großzügige Unterstützung der den Abbruch veranlassenden Verwaltungen möglich, wofür die Autoren an dieser Stelle bereits herzlich danken.

Die Probenentnahme gestaltete sich meistens sehr schwierig. Bei Verkehrsbauten, besonders im Autobahnbereich, sind die Zeiten, in denen die Bauwerke oder die abgebrochenen Reste für die Entnahme von Materialproben zur Verfügung stehen, in der Mehrzahl der Fälle äußerst kurz. Sehr oft sind auch schweres Stemmgerät, u.U. sogar Bagger, Schweiß- und Schneidgeräte mit dem dazugehörigen Fachpersonal erforderlich. Nur die jeweils vorbildliche Unterstützung der zuständigen Behörden machten die Probenentnahmen überhaupt möglich. Dabei wurden die Kontakte zwischen Abbruchfirmen und forschender Stelle vermittelt und normalerweise auch die Leistungen der Abbruchfirma im Rahmen der Probenentnahme übernommen.

Grob klassifiziert ließen sich bei den Probenentnahmen drei Fälle unterscheiden:

- a) Ungünstige Verhältnisse, da Nutzung des Bauwerkes bis zum "letzten Augenblick". Sprengung mit schneller Beseitigung der Trümmer. Proben können nur aus den Trümmern entnommen werden, wobei mögliche Überlastungen der Stähle beachtet werden müssen.
- b) Günstige Verhältnisse, wenn sich der Abbruch in Teilabschnitten über einen längeren Zeitraum vollzieht. Hier sind ggf. auch Messungen der Restvorspannung möglich.
- c) Ideale Verhältnisse, wenn im Rahmen von Schadensfällen und Sanierungsmaßnahmen dem Zustand der Spannbewehrung im Auftrage des Bauherrn mit aller erforderlichen Sorgfalt nachgegangen werden kann.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde angestrebt, bei einer Probenentnahme folgende Proben sicherzustellen:

- Spannstahl (möglichst in Form längerer, unzerstörter Spanngliedabschnitte),
- Proben des Verpreßmörtels (sofern die Entnahme vollständiger Spanngliedabschnitte nicht möglich war),
- Hüllrohrabschnitte (sofern die Entnahme vollständiger Spanngliedabschnitte nicht möglich war), sowie
- Proben des Bauwerksbetons aus unmittelbarer Nachbarschaft der Spannstahl- bzw. Spanngliedentnahmestelle.

Die Probenentnahme wurde am Entnahmeort protokolliert bzw. fotografisch dokumentiert. Bei Probenentnahmen vor dem Abbruch eines Bauwerks oder im Rahmen einer Schadensuntersuchung wurde angestrebt, auch die vorhandene Restvorspannung zu messen. Bei einem Bauwerk gelang es, einen $2,5 \text{ m}^2$ großen Trägerabschnitt sicherzustellen, in dem 2 Spannglieder eingebaut waren.

Der dritte Bearbeitungsabschnitt galt dann den Materialuntersuchungen der bei Abbrüchen gewonnenen Proben und der Auswertung der Laborergebnisse. Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei naturgemäß auf den Spannstahl und die unmittelbare Umgebung im und am Hüllrohr. Dabei wurden in der Regel folgende Einzelschritte durchgeführt:

- Chemische Analyse von Beton und Verpreßmörtel auf Cl-Gehalt
- Ermittlung der mech.-technologischen Kennwerte der Stähle im Zugversuch. Sofern ausreichende Mengen an Probenmaterial vorhanden waren, auch Dauerschwingversuche.
- Darstellung des Oberflächenzustandes von Spannstählen anhand fotografischer Aufnahmen der Oberflächen.

Bei der Präparation der Stahlproben und dem Zerlegen der Spann-
gliedabschnitte wurde die "Ordnung" im Hüllrohr, der Verpreßzu-
stand, das Vorhandensein kleiner Bläschen und ggf. deren Aus-
wirkungen auf die Stahloberfläche protokolliert und fotografisch
dokumentiert.

Wie bereits in Abschnitt 2 dieses Berichtes kurz erwähnt, wurden
in die Auswertung auch Ergebnisse von Schadensuntersuchungen
einbezogen, sofern sie das Thema Langzeitverhalten von Spann-
stählen berührten und zur Verbesserung der Aussagefähigkeit
beitragen konnten. Auf diese Weise wurden die Ergebnisse von
4 Brückenabbrüchen durch weitere 4 Schadensuntersuchungen er-
gänzt.

4. Untersuchungen und Ergebnisse

In dem folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Feld- und Laborversuche nach Bauwerken getrennt dargestellt. Da die Untersuchungen in der Regel an Proben aus Spannbetonbrücken erfolgten, erscheinen die Bauwerke hier chronologisch geordnet, d.h., die Berichterstattung beginnt mit den Ergebnissen des ältesten Bauwerks (Baujahr 1950) und endet mit denen des jüngsten (Baujahr 1965).

Die Ergebnisberichte zu den einzelnen Bauwerken wurden in die Unterabschnitte "Angaben zum Bauwerk" (Alter und Art, Gründe für Abbruch bzw. Schadensanalyse), "Beton" (ggf. Festigkeit, Schadstoffgehalte, Karbonatisierung) und "Spannglieder" (Spannverfahren, Entnahme, Hüllrohr, Verpreßmörtel, Zustand des Spannstahls) gegliedert. Je nach Umfang der möglichen Probenentnahme sind diese einzelnen Unterabschnitte mehr oder weniger umfangreich, das Hauptaugenmerk galt aber in jedem Falle dem Zustand der Spannstähle.

4.1 Ruhrbrücke bei Herdecke

4.1.1 Angaben zum Bauwerk

Die Ruhrbrücke bei Herdecke wurde nach Kriegszerstörung bereits 1950 wieder aufgebaut und war somit bei Untersuchungsbeginn 30 Jahre alt. Sie überquert die Ruhr als Dreifeldbrücke unter einem Winkel von 78° mit Stützweiten von 48.16 m, 64.21 m und 48.16 m. Die Brückendeckbreite setzt sich aus einer 9 m breiten Fahrbahn mit 0,5 m Schrammborden sowie einem einseitig angeordneten, 1.8 m breiten Fuß- und einem 1.6 m breiten Radweg zusammen. Auf der anderen Brückenseite ist zusätzlich ein 4.6 m breiter Streifen mit einem Straßenbahngleis angeordnet.

Bei der insgesamt 17.2 m breiten Fahrbahnplatte handelt es sich um ein durchlaufendes Plattenkreuzwerk (Trägerrost in Verbund mit der Fahrbahnplatte). Im Bereich der Stützmomente der Hauptträger ist die Fahrbahnplatte durch Spannglieder (System Freyssinet) vorgespannt (vgl. Abb. 1). Weitere Angaben zur Konstruktion können einem Aufsatz von Homberg, Kühling und Fuchs in "Der Bauingenieur" 16 (1951) Heft 5 und Heft 6 entnommen werden.

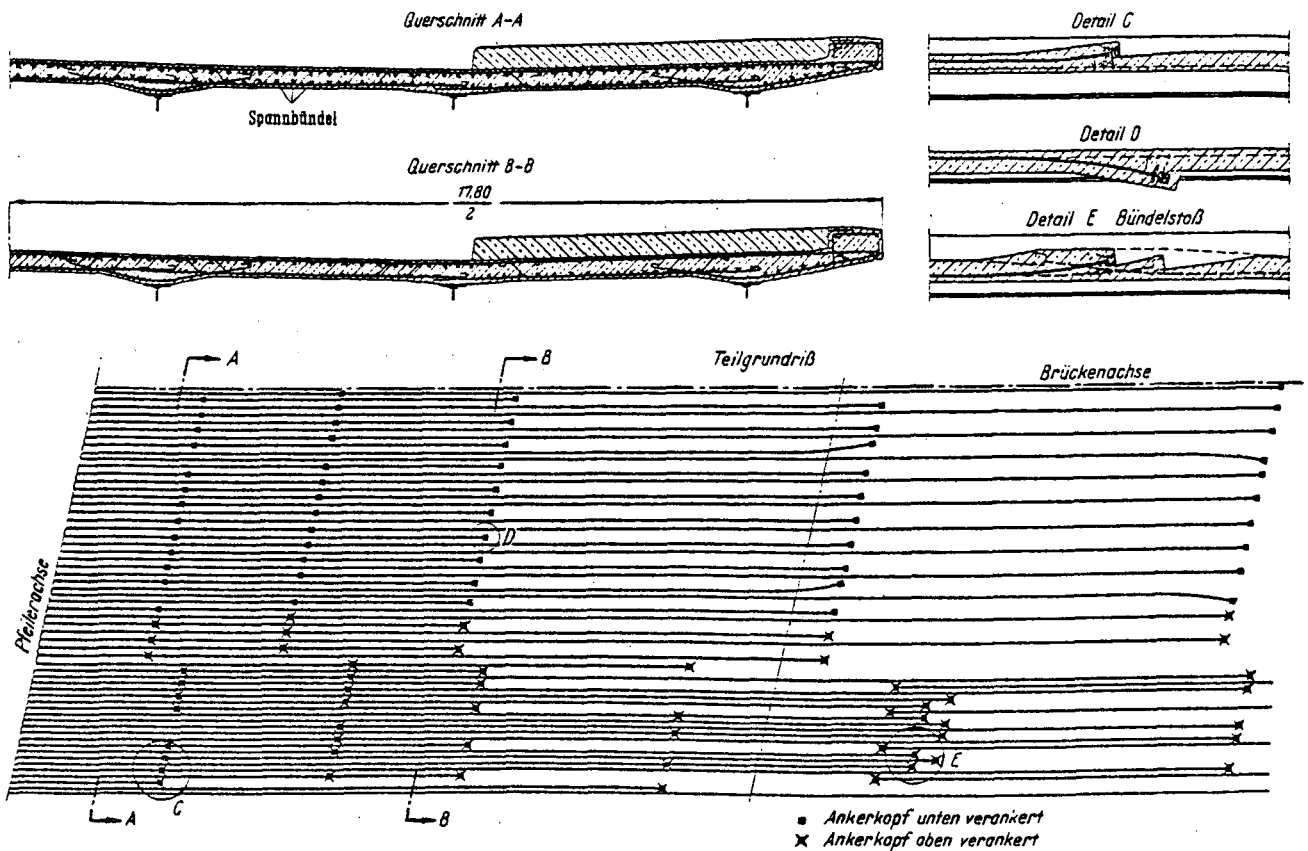


Abb. 1 Zur Lage der Spannglieder in der Ruhrbrücke bei Herdecke

Im Sommer 1980 stellten Mitarbeiter des zuständigen Straßenbauamtes unter dem stark geschädigten Fahrbahnbelag (vgl. Abb. 2) auffällige Cl-Betonkorrosion an der Fahrbahnplattenoberfläche fest (vgl. Abb. 3). Diese Schäden und die während des Betonierens der Fahrbahnplatte aufgetretenen Querrisse veranlaßten die Straßenbauverwaltung zu einer Untersuchung des Fahrbahnplattenzustandes, die vom dieses Forschungsvorhaben bearbeitenden Institut durchgeführt wurde und über deren Ergebnisse daher hier berichtet werden kann. Vorgreifend soll an dieser Stelle schon mitgeteilt werden, daß das Bauwerk aufgrund der Untersuchungsergebnisse nicht abgebrochen, sondern saniert wurde.

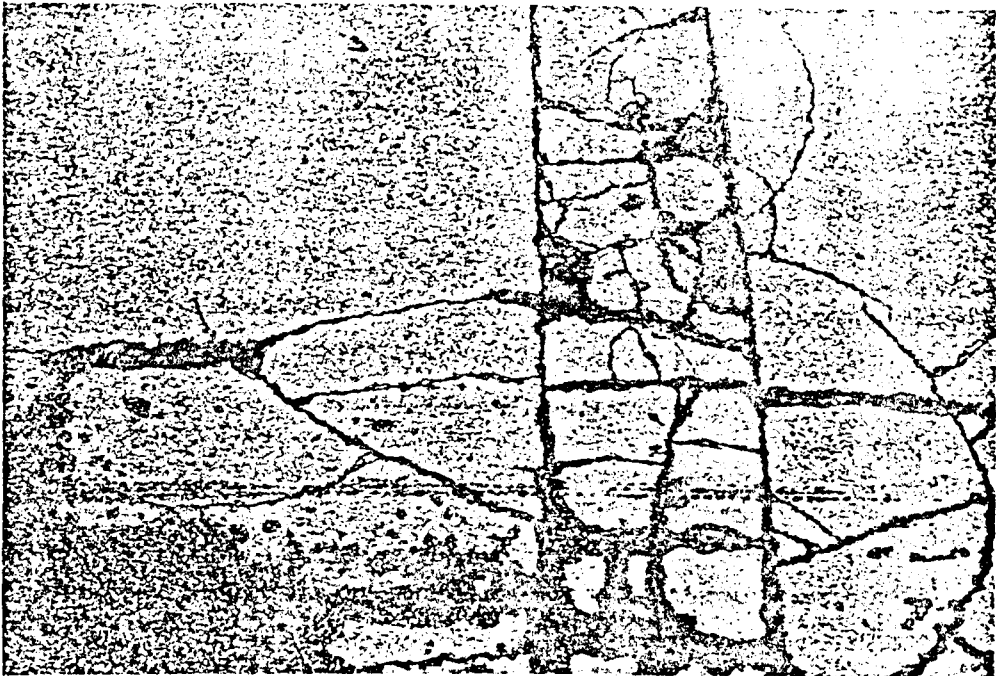


Abb. 2 Schäden im Fahrbahnbelag, die zum Eindringen von Tausalz in die Fahrbahnplatte führten

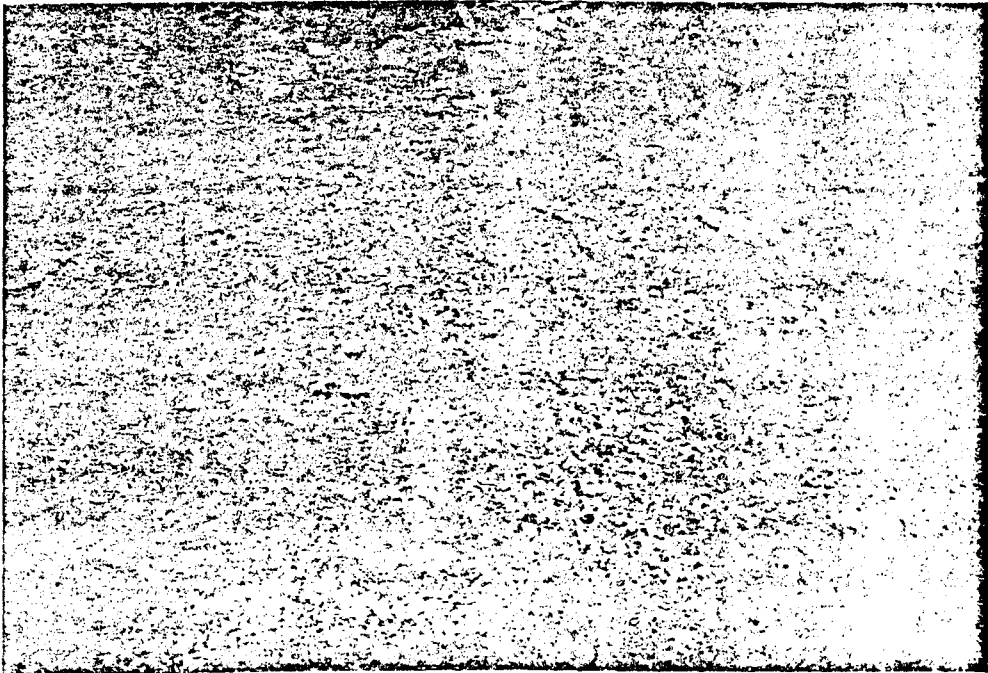


Abb. 3 Cl-Betonkorrosion auf der Fahrbahnplattenoberseite

4.1.2 Beton

Der Fahrbahnplattenbeton war mit Rheinkies und 350 kg/m^3 Eisen-Portlandzement hergestellt worden. Als Betongüte war die damals übliche Güteklasse B370 vorgesehen. Nach Abräumen des Asphaltbelages zeigte sich partiell eine Betonoberflächenkorrosion von etwa 2 cm Dicke infolge Cl-Einwirkung. Die betroffenen Bereiche waren jeweils einige m^2 groß (vgl. z.B. Abb. 3). Bei der Bohrkernentnahme wurden vereinzelt Verdichtungsmängel im Beton neben bzw. unterhalb von Spanngliedern entdeckt, deren Ursache sicher auch in der seinerzeitigen Verwendung nur von Schalungsrüttlern zu erklären ist.

Die Zuordnung der an Bohrkernen von 100 mm \varnothing ermittelten Festigkeiten zur Bauwerksfestigkeit - entsprechend DIN 1045, Tafel 1, ergab, daß der Fahrbahnplattenbeton besser als ein B35 ist. Die Analyse des Betons auf eingedrungene Chloride führte zu folgenden Ergebnissen:

Tiefenbereich [cm]	mittl. Cl-Gehalt Masse-[%] bzgl. Zement-Gew.	Max.-Wert Masse-[%] bzgl. Zement-Gew.	Min.-Wert Masse-[%] bzgl. Zement-Gew.
0 - 2	0,79	1,24	0,37
2 - 4	0,65	1,24	0,31
4 - 6	0,52	0,78	0,30

Im Beton der Fahrbahnplatte wurden außerdem eine große Zahl von Querrissen mit Rißbreiten an der Oberfläche zwischen 0,1 und 0,3 mm festgestellt. Diese Risse durchsetzten die Platte vollständig von oben nach unten und waren nach Außkunft ehemaliger Mitarbeiter des Straßenbauamtes in der Bauzeit noch vor Aufbringen der Vorspannung aufgetreten. Sie hatten bisher jedoch zu keinen erkennbaren Folgeschäden geführt. Es wurde weder Karbonatisierung noch erhöhter Cl-Gehalt in den Rißflächen festgestellt, auch zeigten die Rißflächen kreuzende Bewehrungsstähle keine Auffälligkeiten.

Eine Ermittlung von Karbonatisierungstiefen war aus Gründen der Zugänglichkeit nur an der Fahrbahnplattenoberseite möglich. Infolge des Asphaltbelages und des Schwarzanstrichs hatte keine nennenswerte Karbonatisierung stattgefunden (Karbonatisierungstiefen $< 1 - 2 \text{ mm}$).

4.1.3 Spannglieder und Spannstahl

Die Spannglieder des Bauwerks bestanden jeweils aus 12 Einzeldrähten, $\varnothing 5 \text{ mm}$, rund, glatt der seinerzeitigen Stahlgüte St 165 des Hüttenwerks Krupp-Rheinhausen. Es handelte sich um einen warm gewalzten, vergüteten Spannstahl mit einer Streckgrenze von 145 kp/mm^2 . Hinsichtlich seiner Festigkeitseigenschaften entspricht dieses Material dem heutigen Spanndraht St 1420/1620. Die Drähte wurden um eine Drahtspirale herum parallel verlegt und von einem Hüllrohr ($\varnothing 30 \text{ mm}$, Blechdicke $0,2 \text{ mm}$) ummantelt (vgl. Abb. 4).

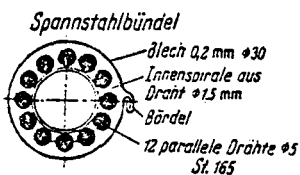


Abb. 4 Schnitt durch ein Spannglied der Ruhrbrücke Herdecke

Das Vorspannverfahren entsprach der von Wayss u. Freytag weiterentwickelten Form von Freyssinet.

Für die Laboruntersuchungen standen leider nur Spanngliedabschnitte von maximal 100 mm Länge zur Verfügung, die aus Bohrkernen herauspräpariert werden konnten. Bei der Bohrkernentnahme äußerte sich das Trennen einzelnen Drähte durch deutlich vernehmbares Knacken und gelegentlich auch durch eine leichte Erschütterung. Eine Untersuchung der Bruch- bzw. Schnittflächen ergab, daß die Stähle ungefähr nach der Durchtrennung des halben Querschnitts gebrochen waren. Das kann wenigstens als grober Hinweis darauf gewertet werden, daß die Vorspannung - auch in der geplanten Größenordnung - noch vorhanden war.

4.1.3.1 Zustand der Hüllrohre

Die Hüllrohre der aus Bohrkernen entnommenen, kurzen Spanngliedabschnitte zeigten ein sehr unterschiedliches Aussehen.

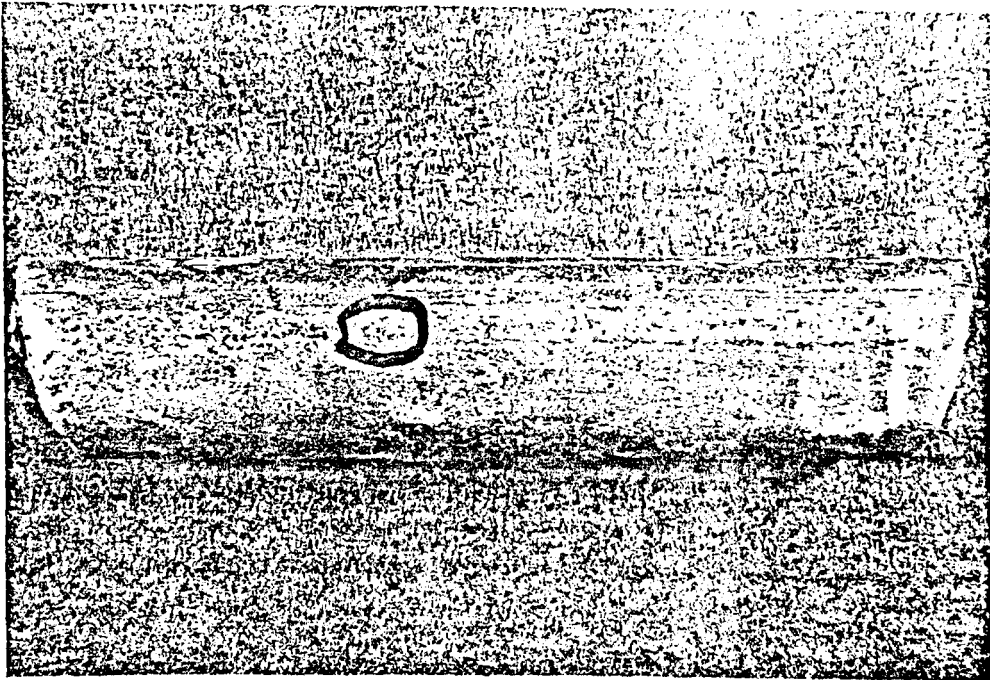


Abb. 5 Hüllrohr mit vernachlässigbarer, leichter Oberflächenkorrosion

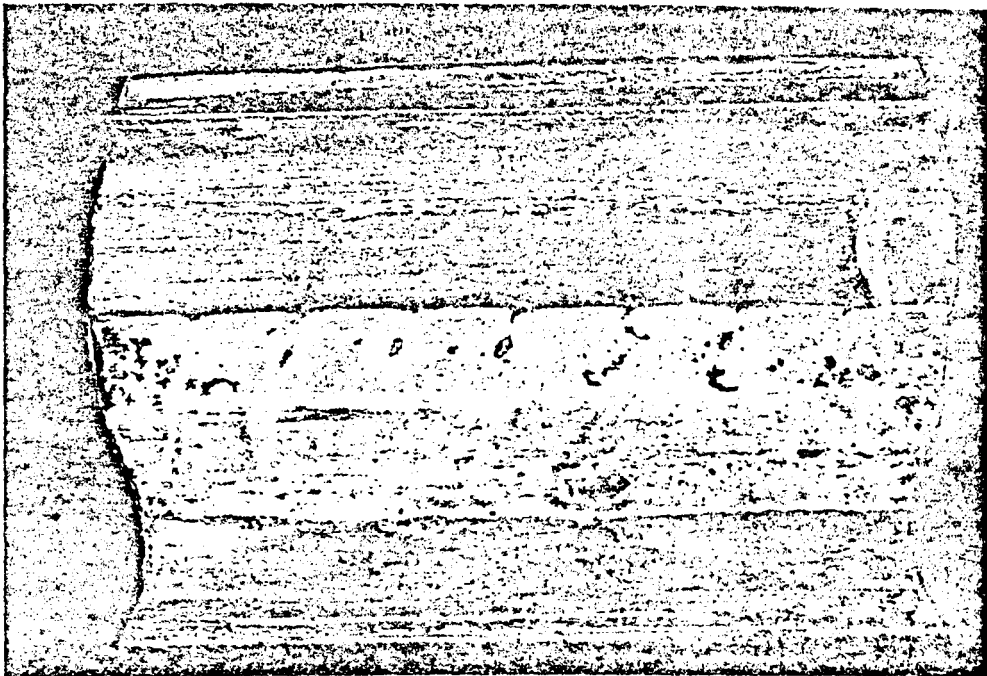


Abb. 6 Hüllrohr der Abb. 5 von innen. Deutlich ist hier die Durchrostung längs der Bördelung zu erkennen

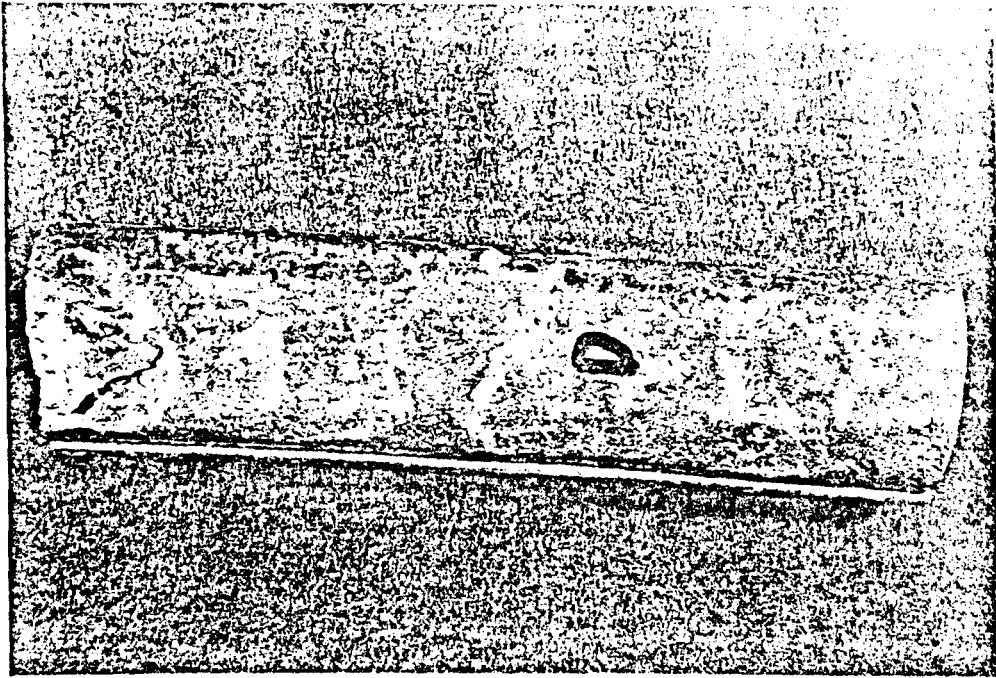


Abb. 7 Ein ebenfalls nahezu blankes Hüllrohr
(vgl. Abb. 5)



Abb. 8 Hüllrohr der Abb. 7 von innen mit
Abdrücken der Drahtspirale infolge
ungeordneter Lage der Spanndrähte.
Im Bördel beginnende Korrosion

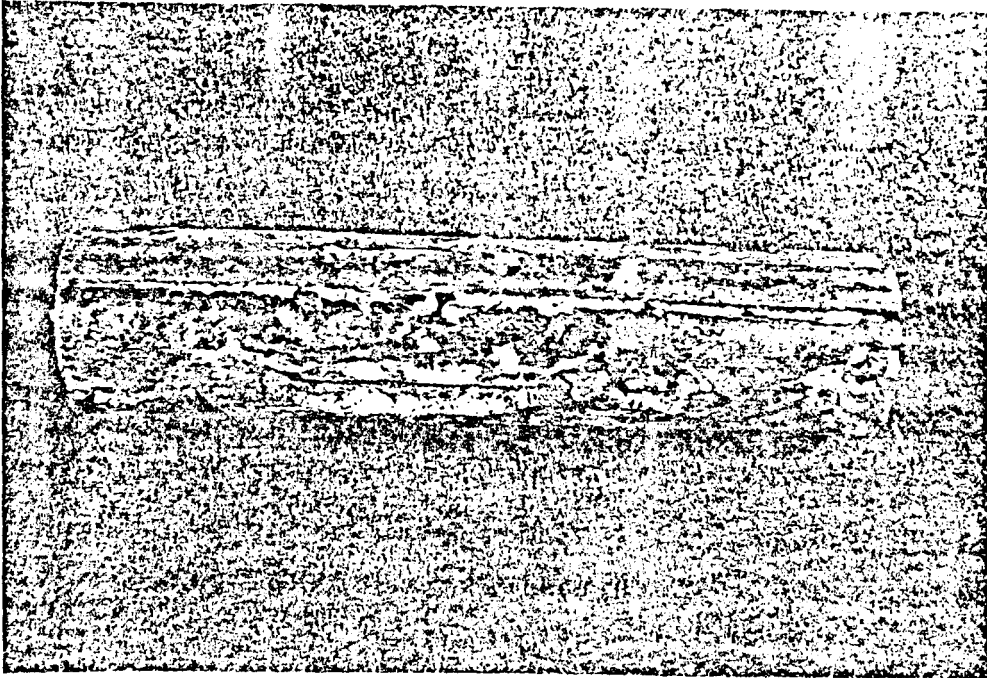


Abb. 9 Korrosionszustand eines Hüllrohres aus
dem Bereich eines Kiesnestes

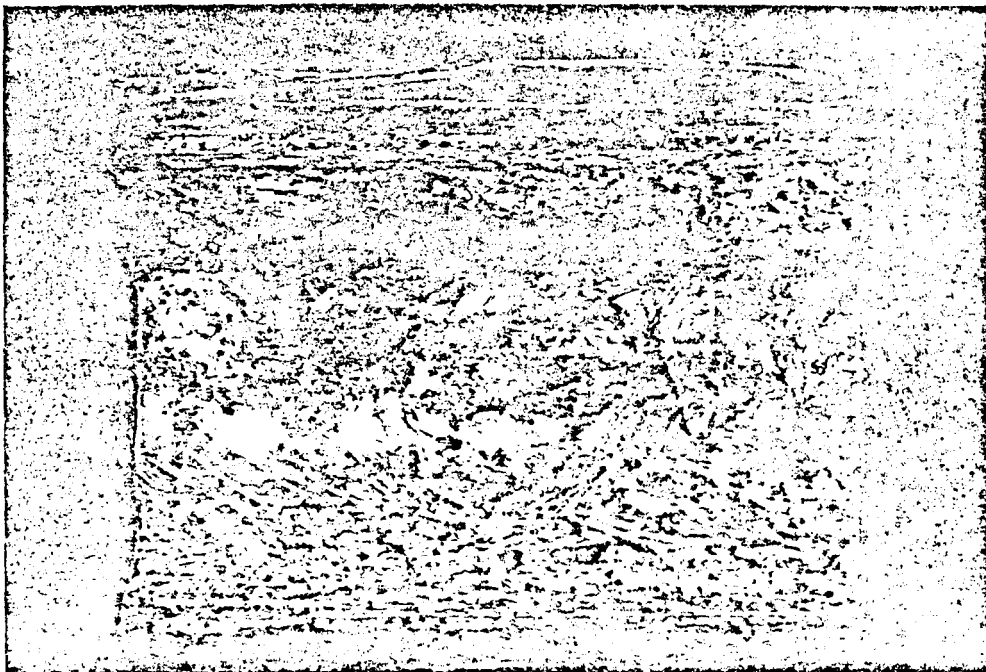


Abb. 10 Hüllrohr der Abb. 9 von innen

Die vorgefundenen Erhaltungszustände erstreckten sich von "innen und außen stark korrodiert mit Durchrostungen" bis "nahezu rostfrei und blank". Nahezu alle Hüllrohre waren jedoch - unabhängig von ihrem sonstigen Korrosionszustand - an ihrer Naht (Bördel, vgl. Abb 4) durchgerostet. Der Verpreßmörtel konnte in die feinen Zwickel und Spalten der Bördelung nicht eindringen, so daß es hier infolge Spaltkorrosion (Belüftungselementbildung) zur Durchrostung kam.

Ein Zusammenhang zwischen Korrosionsgrad der Hüllrohre und Cl-Gehalt des umgebenden Betons konnte selbst bei vergleichsweise hohen Cl-Gehalten von 0,7 - 1,0 Masse-% (bzgl. Zementanteil) nicht festgestellt werden. Bei einwandfreier Betonumhüllung waren die Hüllrohre selbst bei diesen Cl-Gehalten korrosionsfrei. Auffällige Korrosion - auch mit Durchrostungen - war jedoch immer dann aufgetreten, wenn das Spannglied Verdichtungsmängel (Kiesnester, Hohlräume) durchsetzte.

Einen Eindruck vom inneren und äußeren Erhaltungszustand der in der Mehrzahl vorgefundenen "korrosionsfreien" Spannglieder zeigen die Abbildungen 5 - 8. Den Zustand eines Hüllrohres aus einem Bohrkern mit unzureichender Betonverdichtung (Kiesnest) zeigen die Abbildungen 9 und 10. Hier ist das Hüllrohr stark korrodiert und durchgerostet.

4.1.3.2 Verpreßmörtel und Zustand der Verpressung

Die Hüllrohre waren mit einem Zementmörtel verpreßt, dem offenbar bereits ein Quellmittel zugesetzt worden war. Nahezu alle Spanngliedabschnitte platzten längs der Bördelung auf, nachdem sie vom umgebenden Beton des Bohrkern befreit worden waren. Dem Spannglied war vor oder bei dem Verpressen offenbar noch ein Korrosionsschutzmittel hinzugefügt worden, denn der Verpreßmörtel besaß einen auffälligen Geruch nach Bohnerwachs und zeigte zudem eine seltsame, eisblumenartige Struktur (vgl. Abb. 11 und 17).

Eine naßchemische Analyse des Cl-Gehaltes verschiedener Verpreßmörtelproben ergab Werte zwischen 0,15 und 0,22 Masse-%.

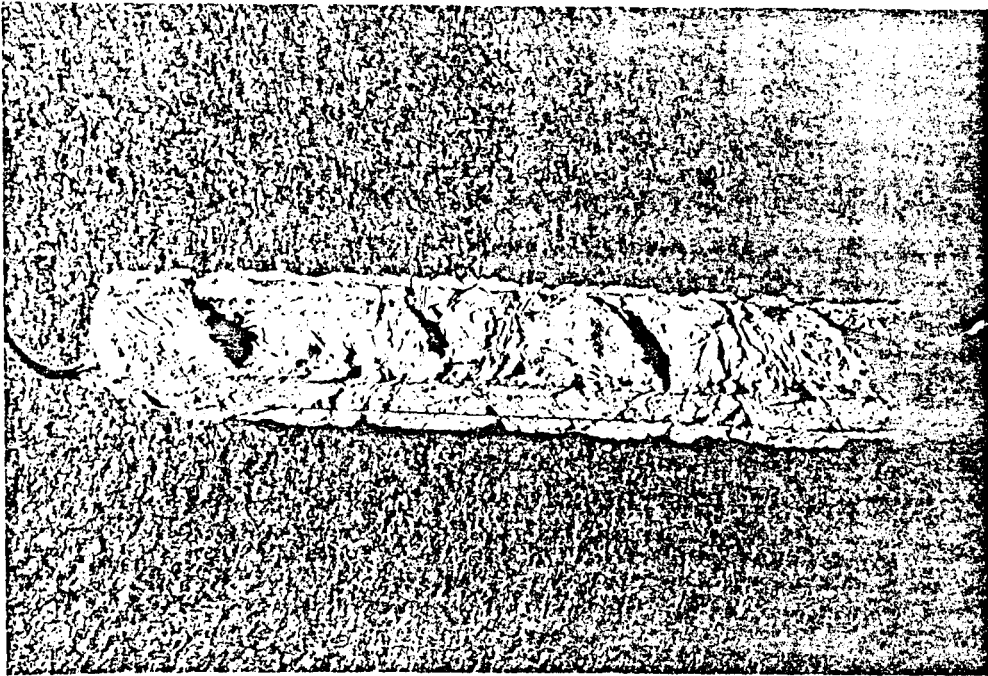


Abb. 11 Verpreßmörtelkern mit Drahtspirale auf dem sich die "eisblumenartige" Struktur oberflächlich abzeichnet

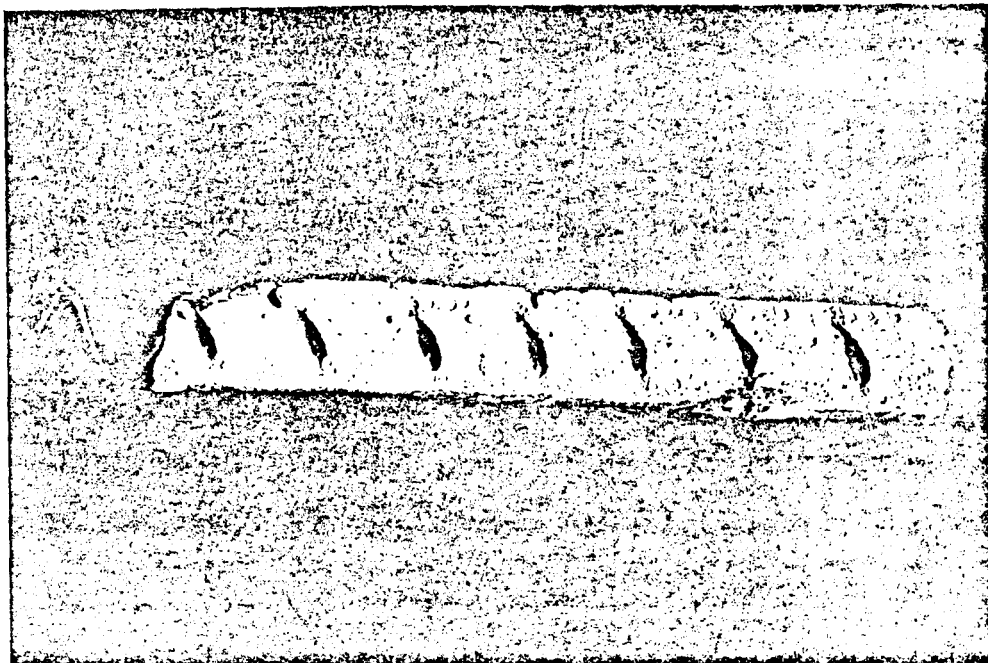


Abb. 12 Hohlraum in der Verpressung längs der oberen Spiralenbögen, die deutlich aus dem Verpreßmörtel herausragen

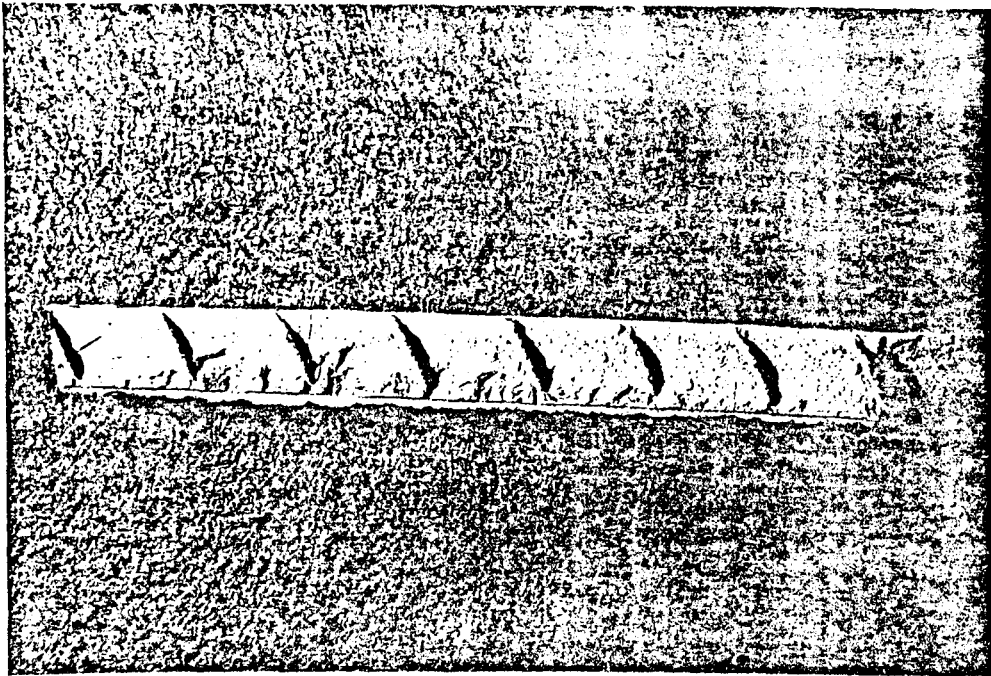


Abb. 13 Hohlraum in der Verpressung längs
der oberen Spiralenbögen, die deutlich
aus dem Verpreßmörtel herausragen

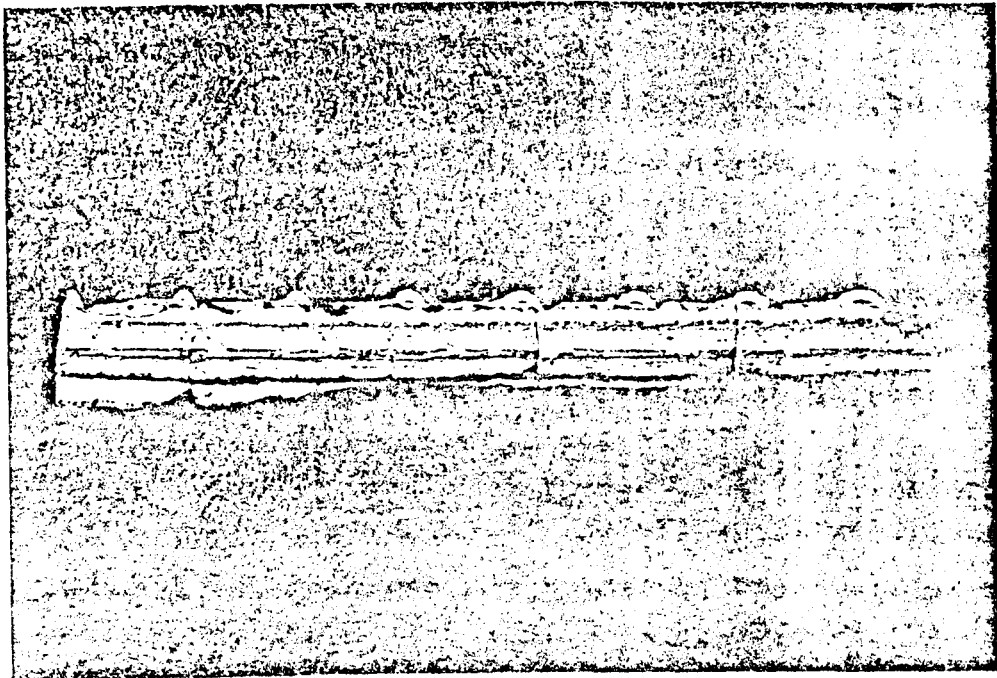


Abb. 14 Seitenansicht des Verpreßmörtelkerns von
Abb. 13 mit den unverpreßten, oberen
Spiralenbögen

Völlig unverpreßte Spannglieder wurden nicht gefunden, die Verpressung war jedoch in mehr als der Hälfte der Fälle fehlerhaft. Es zeigte sich hier ein ganz systematischer Verpreßfehler, der in einer unvollständigen Ausfüllung des Kernhohlraumes innerhalb der Spirale bestand. Bei der hier gewählten Anordnung der Spanndrähte um eine Spirale herum ist es offenbar nicht ohne weiteres einfach, auch den oberen Bereich des innerhalb der Spirale vorliegenden Kernhohlraumes vollständig mit Verpreßmörtel zu verfüllen. Typische Verpreßzustände des Kernbereiches zeigen die Abbildungen 12 - 14. Die oberen Spiralbögen ragen hier frei aus dem Verpreßmörtel heraus und markieren deutlich die Ausmaße der Hohlräume, die sich offenbar über längere Abschnitte des Spanngliedes erstrecken können. Ein ähnlicher Effekt wurde auch in vergleichbaren Spanngliedern anderer Bauwerke festgestellt (vgl. z.B. Kap. 4.6).

Im Bereich dieser Hohlräume waren die Spanndrähte unterseitig naturgemäß nicht vollständig mit Verpreßmörtel bedeckt. Die dem Hüllrohr zugewandten Oberseiten der Drähte hatten dagegen wieder vollen Korrosionsschutz, da der schmale Spalt zwischen Spanndrähten und Hüllrohr in der Regel verpreßt war.

Abgesehen von dem vorstehend beschriebenen Verpreßmangel wurden keine anderen Auffälligkeiten wie Bläschen oder erhöhte Porosität im Verpreßmörtel festgestellt.

4.1.3.3 Ordnung im Hüllrohr

Im Normalfall wurde die geplante Anordnung der Spanndrähte im Hüllrohr durch die eingelegte Drahtspirale gewährleistet (vgl. Abb. 15). Gelegentlich wurden jedoch auch Spannglieder gefunden, in denen diese ringförmige Anordnung der Einzeldrähte um die Spirale herum nicht vorlag (vgl. Abb. 16). Die Drähte waren hier willkürlich über den Spanngliedquerschnitt verteilt, wobei sich oft eine Häufung der Drähte in einer "Ecke" des Hüllrohres ergab. Als Ursachen dafür können sowohl unsorgfältige Verarbeitung als auch ein gekrümmter Spanngliedverlauf angesehen werden, durch den die Drähte beim Vorspannen auf einer Seite des Hüllrohres anlagen und naturgemäß dabei die Drahtspirale



Abb. 15 Spannglied mit ordnungsgemäßer Anordnung der Spanndrähte um die innere Drahtspirale herum



Abb. 16 Spannglied mit unregelmäßiger Anordnung der Spanndrähte, ohne Auswirkung auf die Verpressung

zerquetschen. Am vorliegenden Bauwerk konnten jedoch aus diesen Spanndrahtunordnungen resultierende Verpreßmängel nicht festgestellt werden (s. auch Abb. 16).

4.1.3.4 Zustand des Spannstahls

Die eingebauten, warmgewalzten und vergüteten Spanndrähte der damaligen Stahlgüte St 165, rund, glatt, \varnothing 5 mm, wurden vom Hüttenwerk Rheinhausen geliefert und entsprechen hinsichtlich ihrer Festigkeitseigenschaften dem heutigen St 1420/1620. Aufgrund der Probenentnahme mittels Bohrkernen ($\varnothing \sim 100$ mm) standen keine ausreichend langen Stahlproben für Zug- oder Dauerschwingversuche zur Verfügung.

Den Oberflächenzustand von Spanndrähten aus einwandfrei verpreßten Hüllrohren zeigt Abb. 17. Unter den anhaftenden Verpreßmörtelresten ist deutlich die grau-blaue Färbung der korrosionsfreien Stähle zu erkennen. An derartigen Stählen fanden sich keine äußeren Hinweise, die auf irgendwelche Qualitätseinbußen hindeuteten.

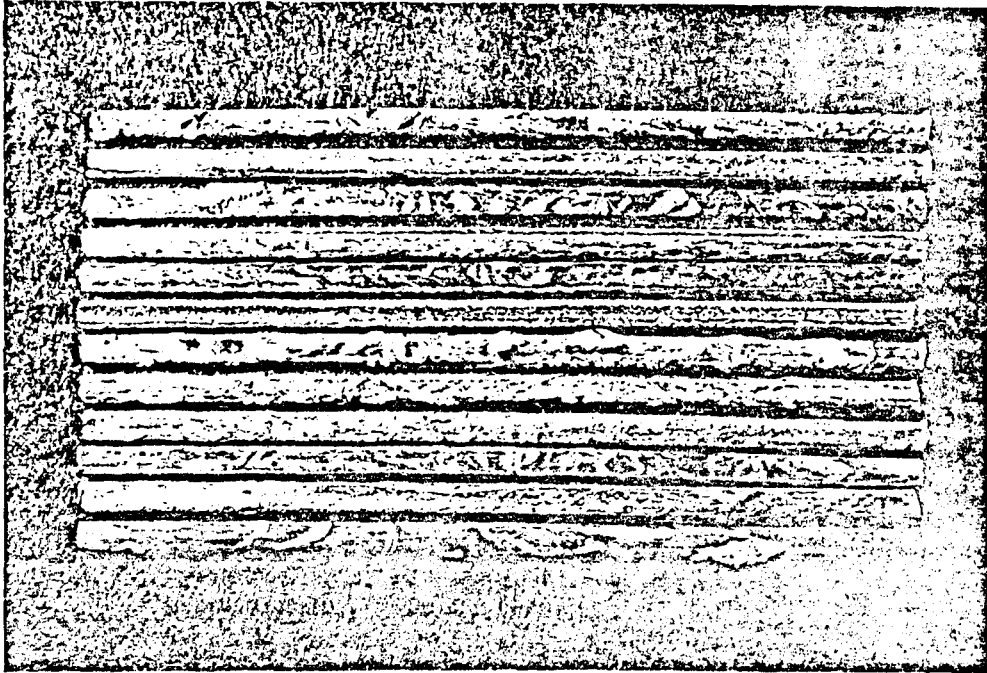


Abb. 17 Spanndrahtabschnitte aus einem vollständig verpreßten Hüllrohr. Die Stähle sind korrosionsfrei und von grau-blauer Oberfläche. Die Verpreßmörtelreste zeigen auch hier die auffällige, eisblumenartige Struktur

Einen Eindruck des Zustandes von Spanndrähten aus Hüllrohren mit den in Abb. 11 - 14 dargestellten Verpreßmängeln im Bereich der inneren Drahtspirale vermitteln die Abbildungen 18 - 22. Die Abbildungen 18 - 20 zeigen die entnommenen Drahtproben, von denen z.T. (Abb. 19 u. 20) der Verpreßmörtel mittels einer feinen Drahtbürste entfernt wurde. Nach dem Entfernen der Verpreßmörtelreste erscheinen die Stahloberflächen grau-blau bis leicht angerostet, wobei den Querschnitt beeinträchtigende Abrostungen in keinem Fall gefunden wurden.

Eine eingehende Untersuchung dieser Proben im Mikroskop zeigte jedoch das Vorhandensein kleiner Korrosionsnarben mit maximalen Durchmessern von 1000µ und Tiefen von max. 300µ, wobei diese Abmessungen Einzelfälle darstellten. Die Abbildungen 21 und 22

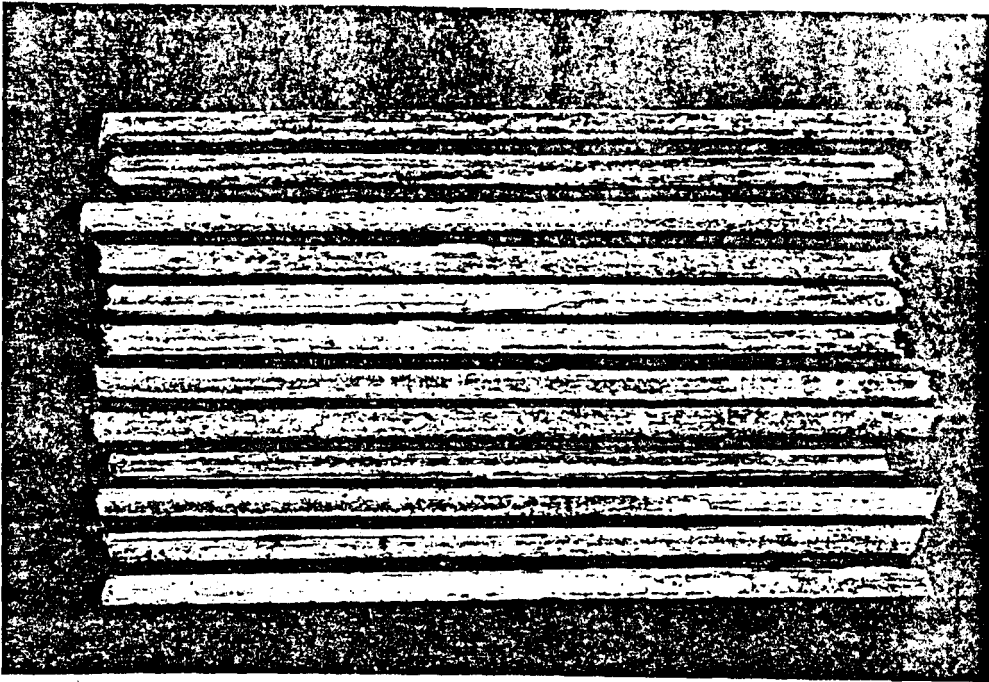


Abb. 18 Spanndrähte mit Oberflächenrost und Verpreßmörtelresten aus einem nicht vollständig ausgepreßten Hüllrohr (vgl. dazu Abb. 11 - 14)

lassen bei etwa 2-facher Vergrößerung diese Narben erkennen, die teilweise auf einer Mantellinie nebeneinander liegen. Diese "Narbenlinien" sind bevorzugt in den Berührungslinien zweier Spanndrähte in den unverpreßten, oberen Hohlräumen des inneren Verpreßmörtelkerns entstanden.

Erfahrungsgemäß beeinflussen derartige Narben die im Zugversuch ermittelten Stahlkennwerte allenfalls um wenige Prozent der Ursprungswerte. Die Abnahme der Dauerschwingfestigkeit ist jedoch in der Regel wesentlich deutlicher und kann bei derartigen Narben schon bis zu 50 % und auch darüber betragen.

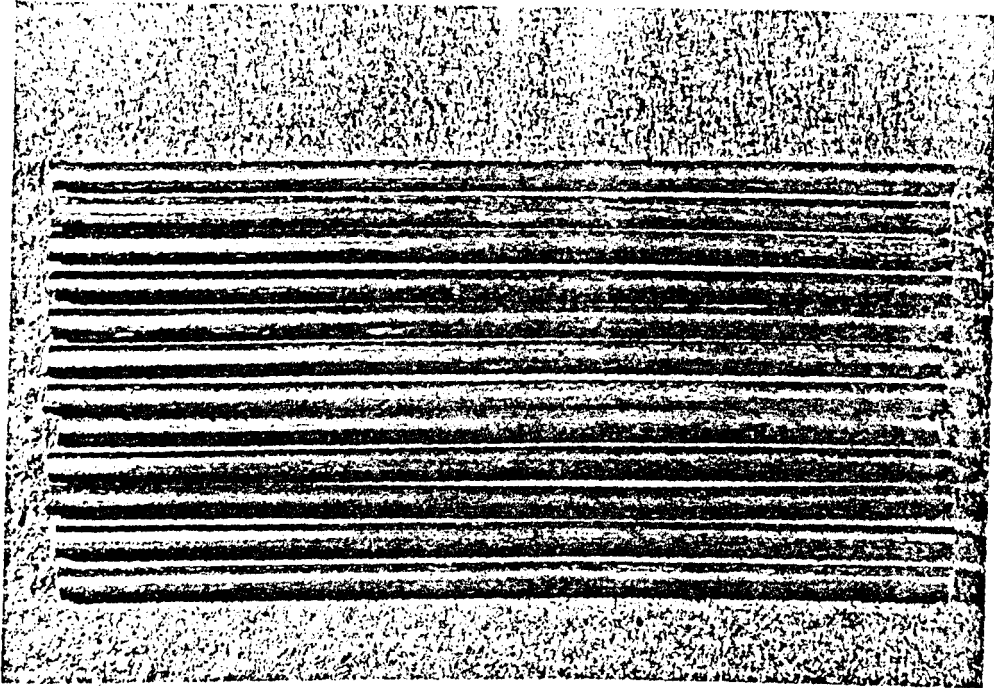


Abb. 19 Spanndrähte aus nicht vollständig ausgepreßten Hüllrohren (vgl. Abb. 18) nach Entfernung der Verpreßmörtelreste mittels einer Drahtbürste

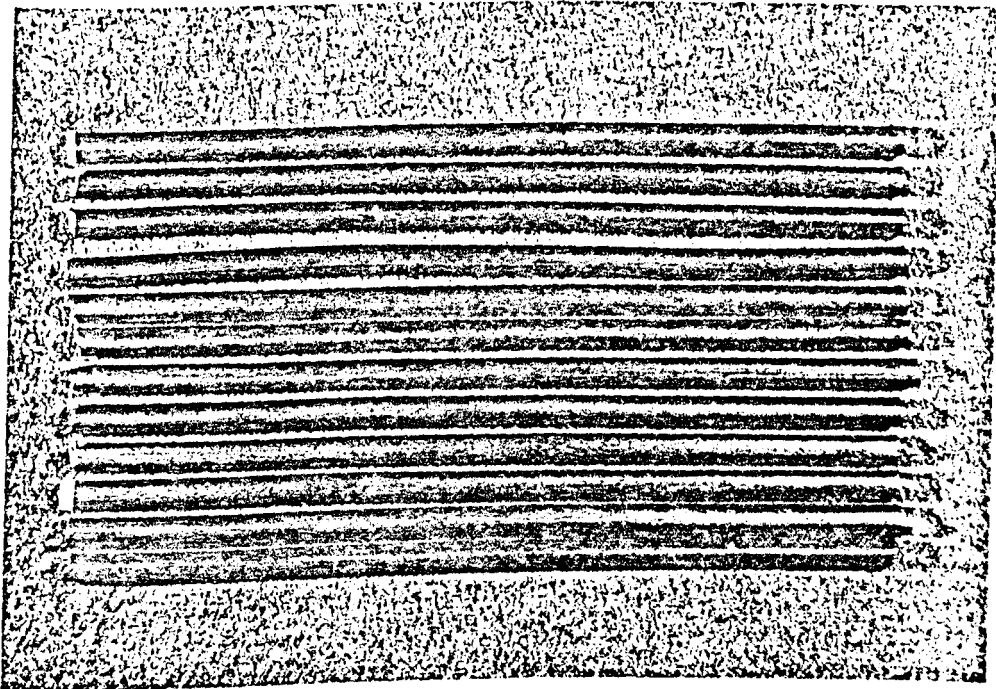


Abb. 20 Spanndrähte aus nicht vollständig ausgepreßten Hüllrohren (vgl. Abb. 18) nach Entfernung der Verpreßmörtelreste mittels einer Drahtbürste

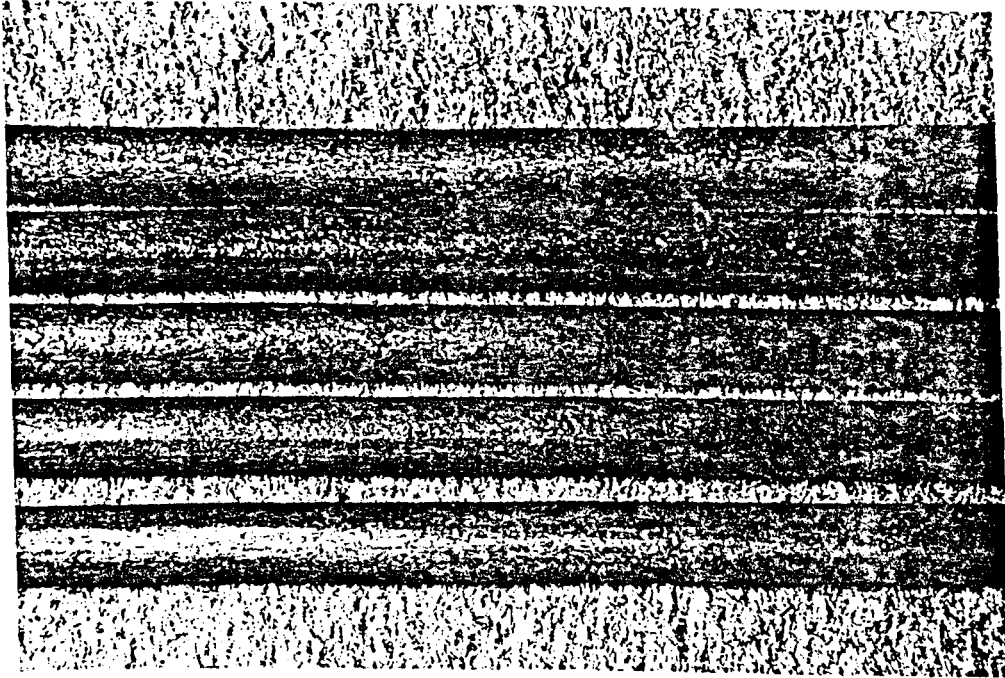


Abb. 21 Spanndrähte aus Abb. 20 bei ca. 2-facher Vergrößerung mit kleinen Rostnarben (max. $\varnothing \sim 300 \mu$, max. Tiefe $\sim 150 \mu$) längs Berührungslinie zwischen zwei Drähten, besonders am untersten Draht der Abbildung

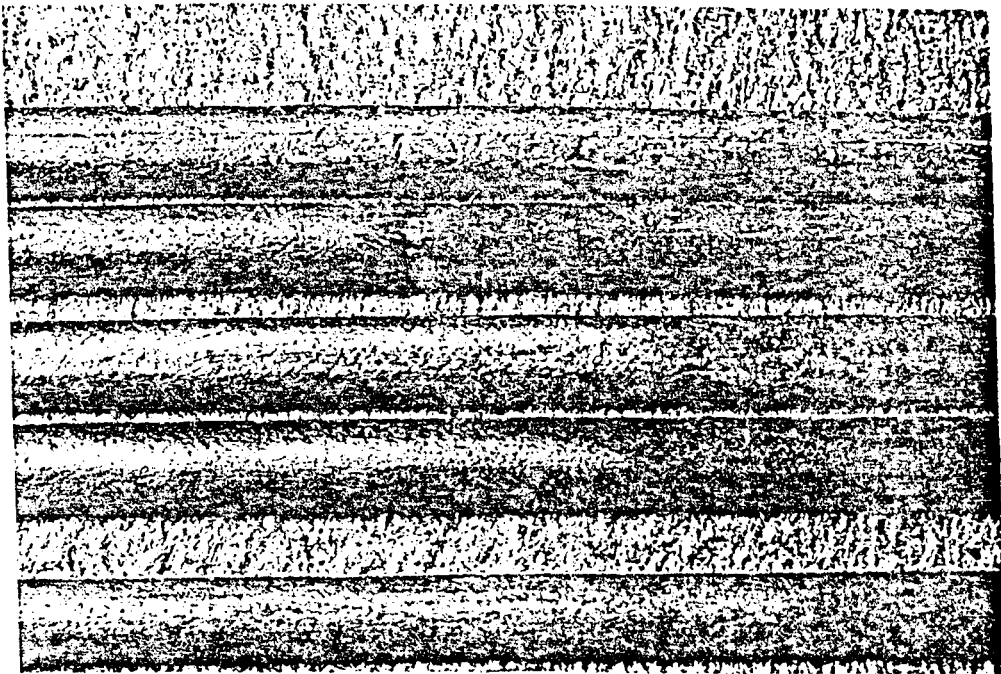


Abb. 22 Spanndrähte aus Abb. 19 bei ca. 2,5-facher Vergrößerung mit kleinen Rostnarben (max. $\varnothing \sim 1000 \mu$, max. Tiefe $\sim 300 \mu$)

4.1.3.5 Zusammenfassende Wertung zum Langzeitverhalten der Spannstähle aus der Ruhrbrücke bei Herdecke

An den ausgebauten Spanngliedabschnitten wurden zwei typische Fehler festgestellt:

- a) Nahezu alle Hüllrohre waren längs ihrer Blechfalze (Bördel) durchgerostet, unabhängig vom sonstigen Erhaltungszustand des Hüllrohres und der Betonumgebung.
- b) In fast allen Hüllrohren war es nicht gelungen, den innerhalb der Drahtspirale befindlichen Kernhohlraum vollständig zu verpressen. Jeweils oberseitig war ein 2 - 3 mm hoher, kalottenförmiger, langgestreckter Resthohlraum verblieben.

Ein nachteiliger Einfluß der durchgerosteten Falze auf den Zustand der Spanndrähte war nach zwischenzeitlich 30-jähriger Nutzung nicht feststellbar, da infolge ausreichender Betondeckung offenbar keine Schadstoffe in die Hüllrohre eindringen konnten. Auch die genannten Verpreßmängel haben den warmgewalzten, vergüteten Spanndrähten der Güte St 165 (heute vergleichbar mit St 1420/1620), rund, glatt, \varnothing 5 mm, nicht zu Brüchen oder den Querschnitt beeinträchtigenden Korrosionsnarben geführt. Die aufgetretenen Narben hatten vereinzelt \varnothing von maximal 1000 μ und Tiefen von max. 300 μ . Nach heutiger Erfahrung werden durch derartige Narben die Festigkeiten der Stähle nur geringfügig, die Verformungskennwerte und die Dauerschwingfestigkeiten dagegen erheblich abgemindert.

Die vorgefundenen geringen Schäden in den unverpreßten Bereichen erklären sich aus der völligen Abgeschlossenheit der Hohlräume gegenüber der Außenwelt. Langzeitig eingedrungene Feuchtigkeit, ggf. mit Schadstoffen, hätte sicher zu Drahtbrüchen geführt.

Spannstähle in einwandfrei verpreßten Hüllrohren waren auch nach 30-jähriger Nutzungsdauer frei von äußerlich erkennbaren Schäden.

4.2 Leinebrücke bei Olxheim

4.2.1 Angaben zum Bauwerk

Die Leinebrücke bei Olxheim ist eine der ältesten Spannbetonbrücken Niedersachsens. Der 29 m lange und 8,30 m breite Überbau ist als 1-Feld-Trägerrost mit 8 vorgespannten Längsträgern und 7 Querträgern ohne Vorspannung ausgebildet. Das frühe Baujahr 1952 erklärt auch die heute ungewöhnliche Verlegung der Spanndrähte in seitlich offenen Spannkammern auf beiden Seiten der Längsträger (vgl. Abb. 23).

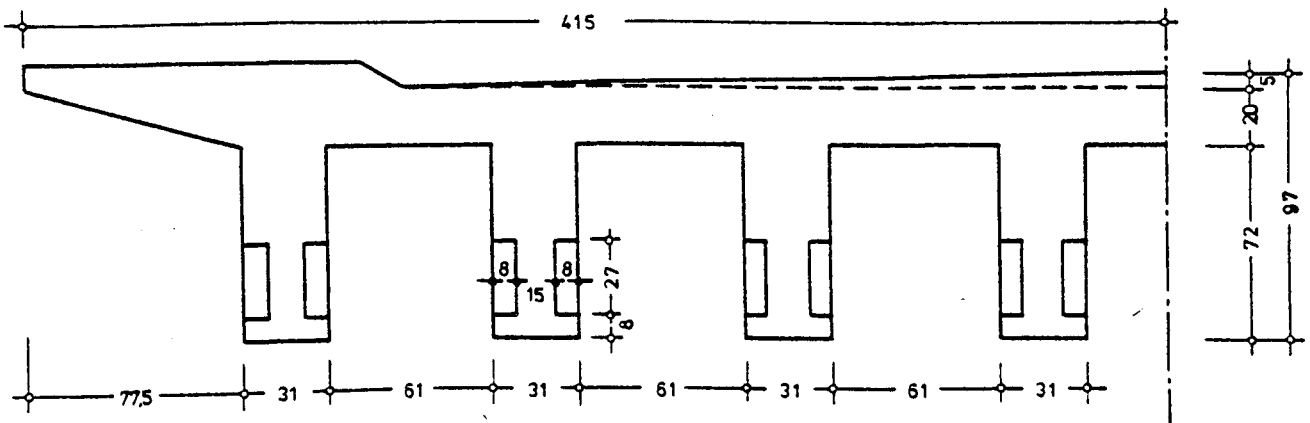


Abb. 23 Schnitt durch die Fahrbahnplatte der Leinebrücke bei Olxheim. Die seitlichen Aussparungen in den Längsträgern dienen zur Aufnahme von jeweils 100 Spanndrähten St 145/165 (St 1420/1620), rund, glatt, \varnothing 5 mm

In diese Spannkammern wurden jeweils 100 Spanndrähte (von unten nach oben 25 Lagen zu 4 Drähten) der Güte St 145/165 (St 1420/1620), rund, glatt, \varnothing 5 mm, warmgewalzt und vergütet eingebaut. Nach dem Vorspannen wurden die Spannkammern mit Zementmörtel ausgefüllt und außen glattgestrichen.

1978 wurden auffällige Mörtelabplatzungen im Bereich der Spannkammern entdeckt, die 1979 eine ausführliche Untersuchung der Fahrbahnplatte und insbesondere des Spannstahlzustandes erforderten. Die Untersuchungsergebnisse führten nicht zum Abbruch, sondern zu einer Sanierung des Bauwerks, wobei wegen irreparabler Schäden an Spanndrähten eine Rückstufung der Brückenklasse erforderlich war.

Einen Eindruck vom Bauwerk mit der Einrüstung für die Untersuchung und die anschließende Sanierung vermittelt Abbildung 24.

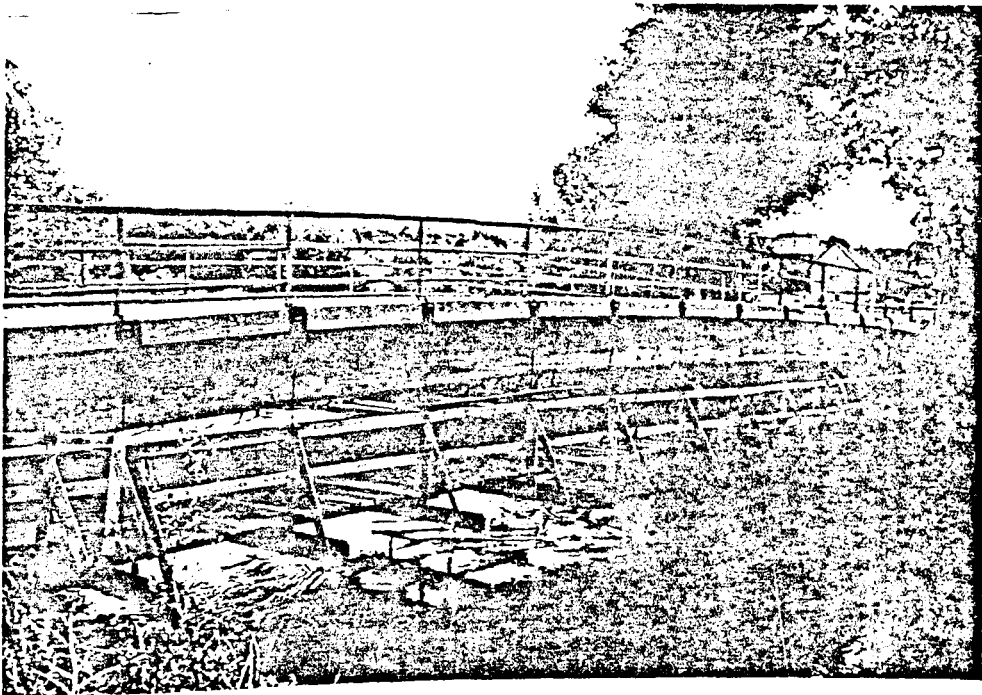


Abb. 24 Leinebrücke bei Olxheim im Jahre 1979
während der Probeentnahmen

4.2.2 Beton des Überbaus

Eine eingehende Inspektion der Fahrbahnplatte von der Unterseite her ergab keine Hinweise auf Ausführungsfehler oder durch

Nutzung hervorgerufene Schäden am Beton, obwohl das Tragwerk unterseitig bei Hochwasser in die Leine eintaucht. Außerhalb der vermörtelten Spannkammerbereiche waren die Betonoberflächen frei von Verdichtungsfehlern, Rissen oder Ausblühungen. Verschmutzungen hatten ihre Ursache im wiederholt auftretenden Hochwasser. Schläge mit dem Hammer sowie Stemmversuche mit Hammer und Meißel bestätigten den guten Gesamteindruck. Bohrkern wurden nicht entnommen.

4.2.3 Spannglieder und Spannstahl

In die seitlichen Spannkammern der Längsträger waren jeweils 100 Spanndrähte (St 145/165 (St 1420/1620), rund, glatt, \varnothing 5 mm, warmgewalzt und vergütet) in vier vertikal nebeneinanderliegende Lagen zu je 25 Drähten eingebaut. Durch Abstemmen der Mörtelüberdeckung waren die äußersten Lagen der Spannkammer für die Inspektion und Probenentnahme einfach freizulegen, da bei Überdeckungen von $< 2 - 3$ cm die außenliegende Mörtelschicht durch Rostabsprengung gelockert und z.T. schon abgefallen war. Einen Eindruck von der Situation am Bauwerk vermitteln die Abbildungen 25 bis 27.

4.2.3.1 Zustand der Hüllrohre

Hüllrohre wurden bei dem hier angewandten Spannverfahren nicht verwendet.

4.2.3.2 Verpreßmörtel und Zustand der Verpressung

Die Spannkammern waren mit einem weiß-gelblichen Mörtel verfüllt worden. Es handelte sich dabei nicht um die übliche Verfüllung von Spanngliedern aus Zement und Wasser, sondern um einen Mörtel mit Sandzusatz. Zum Teil war dieser Mörtel noch sehr fest, zum Teil ließ sich aber auch Sand mit den Fingern ausreiben. Die Spannkammern waren bis auf einen unterschiedlich breiten Spalt (ca. 1- max. 3 cm) an der Oberseite (vgl. Abb. 25 und 26) vollständig mit diesem Mörtel verfüllt. Sofern in diesem Spalt noch Spanndrähte lagen, waren sie stark korrodiert bzw. z.T. gerissen.

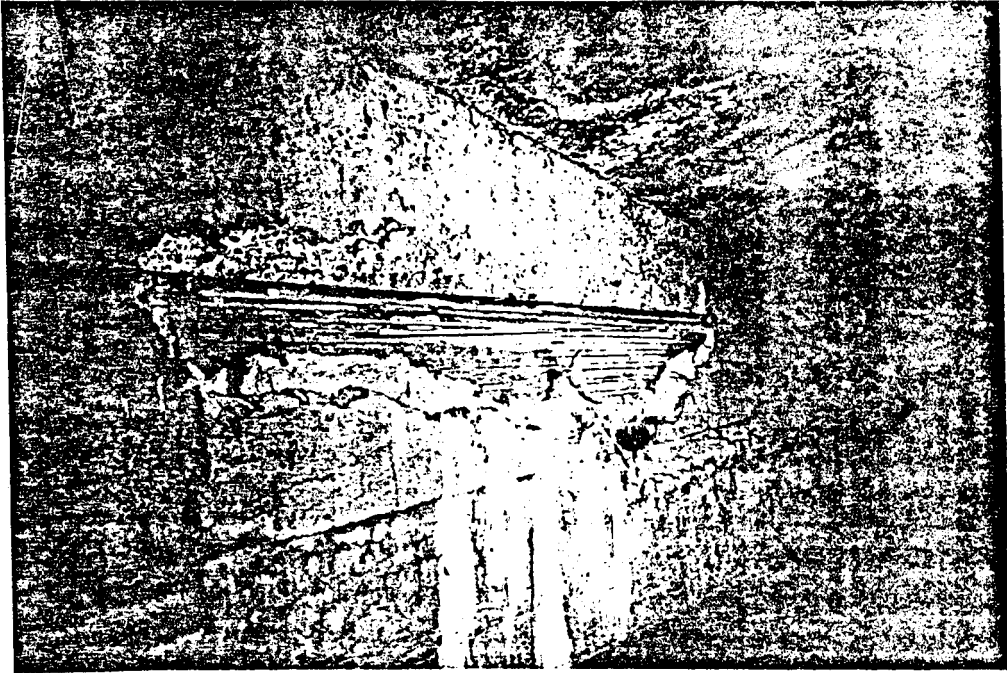


Abb. 25 Rostabsprengungen im Bereich der seitlichen Spannkanäle. Deutlich ist die unzureichende Mörtelverfüllung im oberen Bereich der Spannkammer mit Spannstahlbrüchen zu erkennen

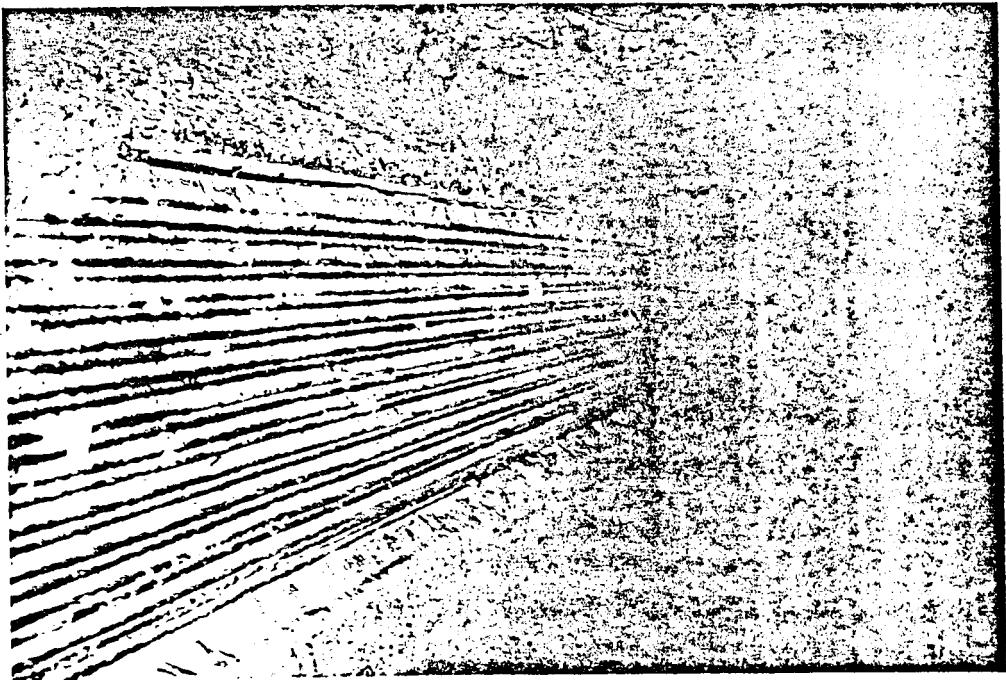


Abb. 26 Durch Abschlagen der Überdeckung freigelegte, äußere Spanndrahtlage eines Spannkanals. Infolge Karbonatisierung sind die Spannstähle korrodiert

Die Überdeckung der äußersten Spanndrahtlage war in der Regel völlig unzureichend. Es wurden Werte zwischen 0,5 cm und 2,5 cm gefunden (vgl. Abb. 27). Infolge Karbonatisierung dieser dünnen Schichten war ein Teil der Überdeckung durch Korrosion der äußeren Spanndrahtlage bereits abgedrückt worden.

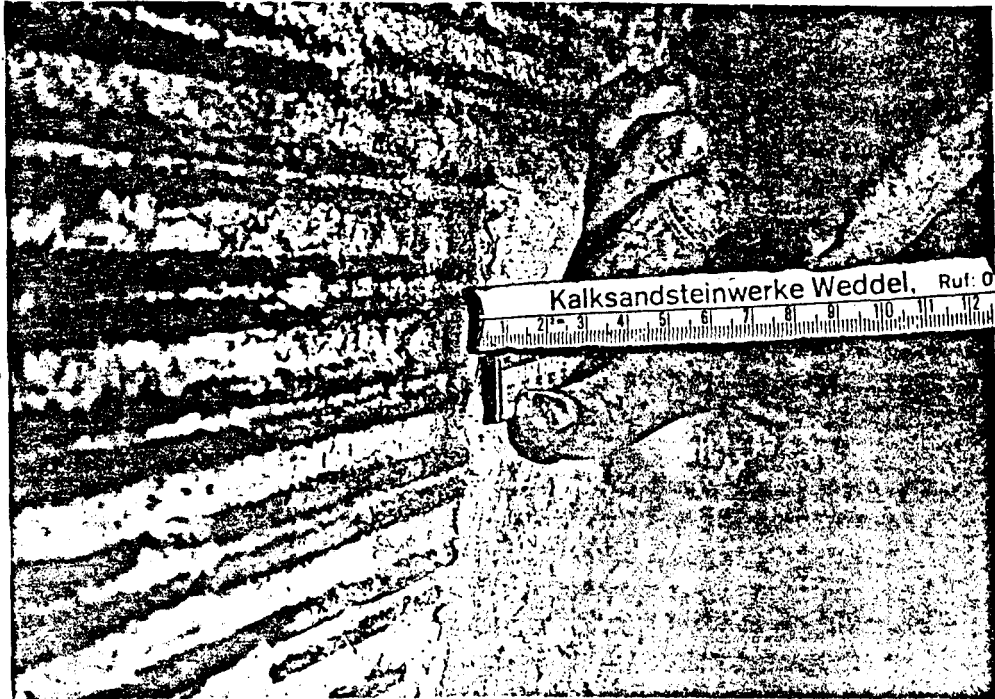


Abb. 27 Völlig unzureichende Überdeckung von nur 5 mm der äußeren Spanndrahtlage

Eine Überprüfung der Karbonatisierungstiefen mit Phenolphthaleinlösung ergab, daß bei Tiefen von 15 - 20 mm die erste Spanndrahtlage bereits keinen ausreichenden Korrosionsschutz mehr besaß. Die zweite vertikale Spanndrahtlage war jedoch in der Regel noch nicht von der Karbonatisierungsfront erreicht.

Daß bei Einsatz eines geeigneteren Verfüllmörtels und 2,5 cm Überdeckung auch nach 28-jähriger Nutzung ein schadensfreier Erhaltungszustand möglich gewesen wäre, zeigt Abb. 28. Eine Spannkammer war mit einem Mörtel der typisch zement-grauen Farbe verfüllt. Das Freistemmen bereitete große Mühe, denn dieser Mörtel war sehr fest und offenbar auch sehr dicht, da die Karbonatisierung bereits bei etwa 5 - 6 mm endete. Die freigelegten Spanndrähte waren dementsprechend einwandfrei. Warum diese Spannkammer anders als alle übrigen verfüllt worden war, konnte nicht mehr festgestellt werden.

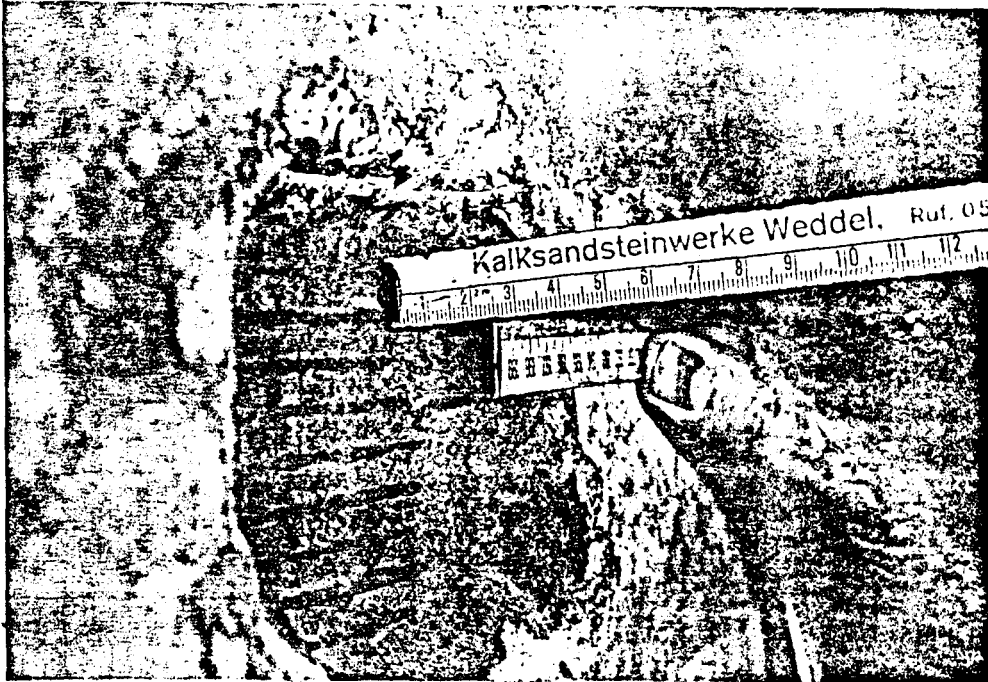


Abb. 28 Zementgrauer Verfüllmörtel von hoher Festigkeit und großer Dichte konnte bei Karbonatisierungstiefen von nur 5 mm und einer Überdeckung von 25 mm über 28 Jahre den Spanndraht wirkungsvoll vor Korrosion schützen

Da das Tragwerk bei Hochwasser vom Wasserspiegel der Leine erreicht wird, wurde der Verfüllmörtel der Spannkammern auf ggf. eingeschwemmte Schadstoffe untersucht. Es ergaben sich folgende Analysewerte:

	Masse-% bzgl. Zementgehalt	
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Mittelwert	0,074	0,018
Spitzenwert	0,080	0,028

Auch die jeweiligen Spitzenwerte konnten langfristig nicht zu Korrosionsschäden führen, die Gehalte an Cl⁻ und NO₃⁻ stammen mit Sicherheit aus Anmachwasser, Zement und Sandzuschlag.

4.2.3.3 Ordnung in den Spannkammern

Durch Abschlagen der äußeren Überdeckung der Spannkammern konnte festgestellt werden, daß durch geeignete Maßnahme

(Abstandhalter, Kämme) eine gleichmäßige Anordnung der Spanndrähte in den Kammern gelungen war, die auch das Eindringen des Verfüllmörtels zwischen die einzelnen Drahtlagen ermöglicht hatte (vgl. Abb. 25 - 28).

1.2.3.4 Zustand des Spannstahls

Der eingebaute, warmgewalzte und vergütete Spanndraht, rund, glatt, St 145/165 (St 1420/1620), \varnothing 5 mm der Krupp Hüttenwerke Rheinhausen besaß nach noch vorhandenen und von den Krupp Hüttenwerken dankenswerter Weise zur Verfügung gestellten Unterlagen der damaligen Werkseigenüberwachung folgende Gütekennwerte:

$R_{po,01}$ N/mm ²	$R_{po,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	E N/mm ²	Ag %	$A_{L=50}$ %	Z %
-	1490- 1550	1620- 1690	-	-	7 - 9	40-45

Korrosionsfreie Spanndrähte (vgl. zum Zustand Abb. 29) aus nicht karbonatisierten Verfüllmörtelbereichen der Spannkammern ergaben im Vergleich dazu folgende Werte:

$R_{po,01}$ N/mm ²	$R_{po,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	E N/mm ²	Ag %	$A_{L=50}$ %	Z %
1240	1450	1630	2×10^5	3,5	8,5	33

Spanndrähte aus der äußeren, vertikalen Spanndrahtlage, deren Zustand in den Abbildungen 30 und 31 dargestellt ist, wiesen in der Regel stark korrodierte Oberflächen mit Narbentiefen bis 0,5 mm auf. Im Zugversuch ergaben sich an derartigen Drähten folgende Kennwerte

$R_{po,01}$ N/mm ²	$R_{po,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	E N/mm ²	Ag %	$A_{L=50}$ %	Z %
1240	1410	1540	$1,9 \times 10^5$	1,7	4,7	16

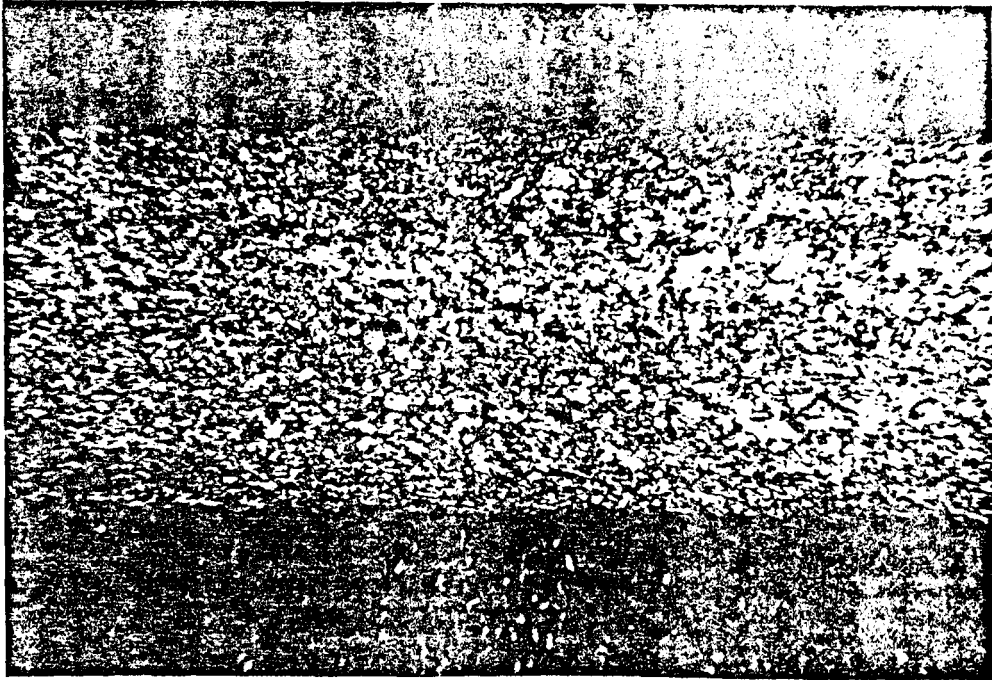


Abb. 29 Spanndrahtoberfläche eines Drahtes
aus nichtkarbonatisiertem Mörtel
(Vergrößerung ca. 10-fach)

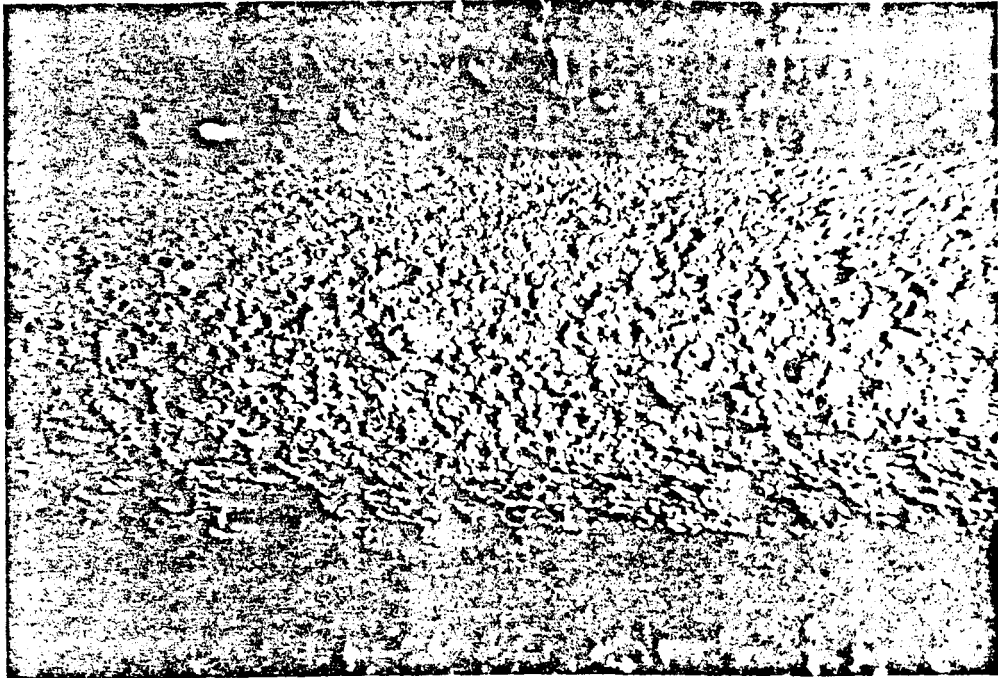


Abb. 30 Spanndrahtoberfläche eines Drahtes aus
der äußeren, vertikalen Spanndrahtlage
(vgl. Abb. 25-28) nach Ablösen der
Korrosionsprodukte bei ca. 10-facher
Vergrößerung. Narbentiefe bis max. 500 μ

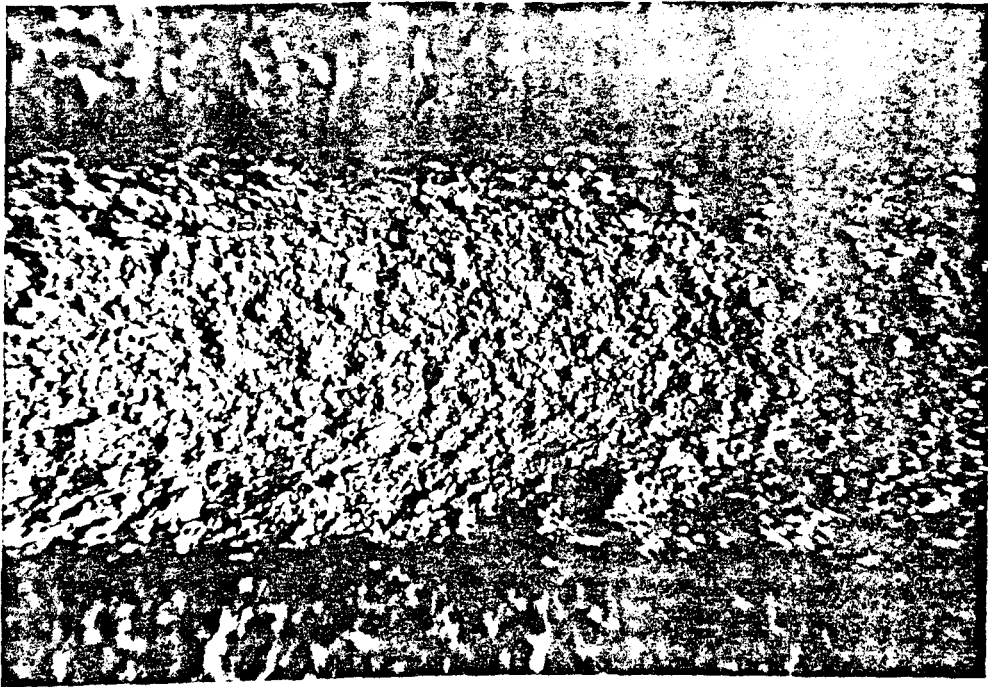


Abb. 31 Spanndrahtoberfläche eines Drahtes aus der äußeren, vertikalen Spanndrahtlage (vgl. Abb. 25-28) nach Ablösen der Korrosionsprodukte bei ca. 10-facher Vergrößerung. Narbentiefe bis max. 500 μ

Die Spanndrähte aus nichtkarbonatisierten Mörtelbereichen zeigen - wenn überhaupt - vernachlässigbare Abminderungen der Gütekennwerte. Das Material erfüllt auch noch die heutigen Zulassungsanforderungen. Ein unmittelbarer Vergleich mit den eingangs aufgeführten Kennwerten der Werkseigenüberwachung aus den Jahren 1951/52 ist nur bedingt möglich, da eine Chargengleichheit nicht voraussetzbar ist. Sehr deutlich ist dagegen eine Abminderung bei den oberflächlich stärker angerosteten Spanndrähten mit Narbentiefen bis zu 0,5 mm zu erkennen. Während die Festigkeitskennwerte nur um etwa 5 % abgefallen sind, zeigen die verformungskennwerte A_g , $A_{L=50}$ und Z eine Abnahme von ca. 50 %.

Brüche von Spanndrähten fanden sich nur vereinzelt in den von Baubeginn an unverpreßten Spalten der oberen Spannkammerbereiche (vgl. Abb. 25). Die Brüche waren an korrosionsbedingten Querschnittsschwächungen (vgl. z.B. Abb. 32) entstanden, nicht aber durch Spannungsrißkorrosion.

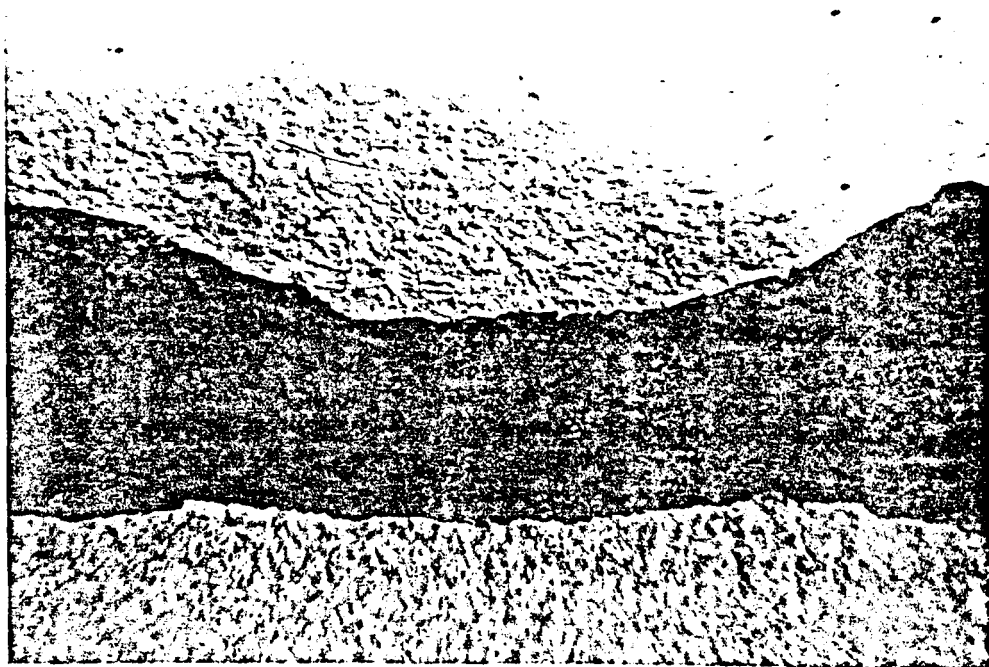


Abb. 32 Querschnittsabminderung von Spanndrähten aus dem oberen, unverfüllten Abschnitt der Spannkammern (vgl. Abb. 25 u. 26). Infolge dieser Abminderung kam es auch zu Drahtbrüchen

Die Messung der Restvorspannung erfolgte mittels aufgeklebter Dehnmeßstreifen durch Trennen von Einzeldrähten (vgl. Abb. 33). Die gemessenen Werte der Stahldehnung aus Vorspannung liegen i.M. bei 3,3 ‰, d.h. bei einem E-Modul von $2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ beträgt die noch wirksame Vorspannung 660 N/mm^2 . Geht man davon aus, daß 1952 eine Vorspannung von $0,55 \times R_m$ aufgebracht wurde, wären davon infolge Kriechen und Schwinden des Betons und Relaxation des Spannstahls noch 75 ‰ vorhanden.

4.2.3.5 Zusammenfassende Wertung zum Langzeitverhalten der Spannstähle aus der Leinebrücke bei Olxheim

Nach ca. 28-jähriger Nutzung zeigten die warmgewalzten und vergüteten Spannstähle St 145/165 (St 1420/1620), rund, glatt $\varnothing 5 \text{ mm}$, keine signifikanten Abminderungen der mechanisch technologischen Gütekennwerte, sofern sie von nichtkarbonatisiertem Verpreßmörtel der Spannkammern umgeben waren.

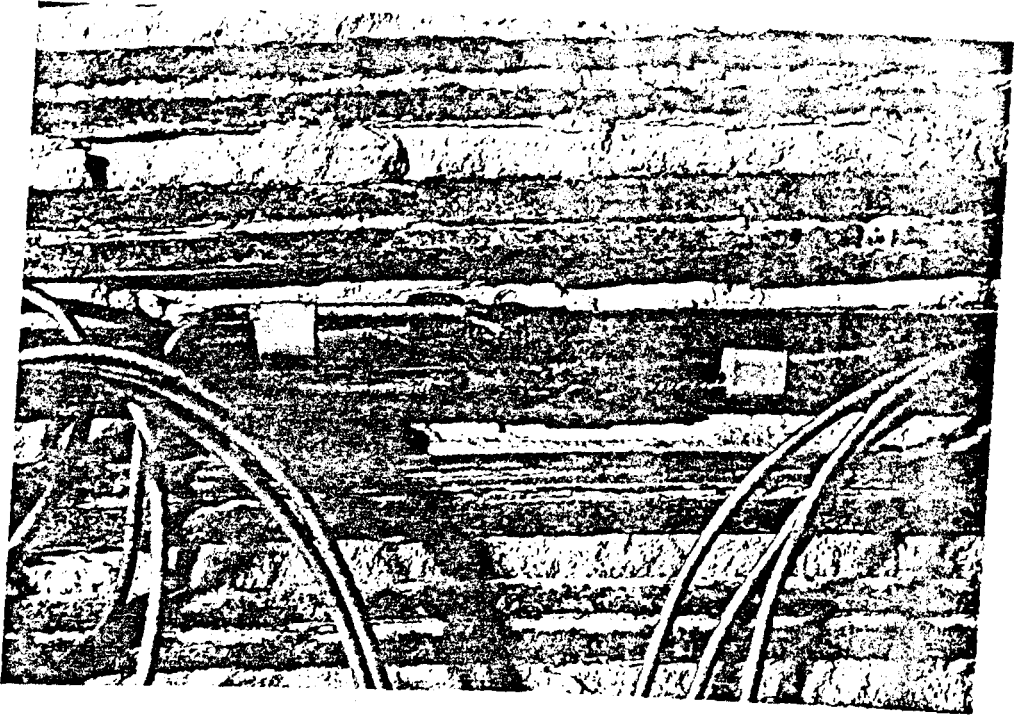


Abb. 33 Messung der Restvorspannung an Spanndrähten mittels aufgeklebter DMS durch Trennen der Drähte

Spanndrähte aus karbonatisierten Mörtelbereichen zeigten deckende Oberflächenkorrosion mit Rostnarbentiefen bis zu 0,5 mm. Die Korrosionsbeanspruchung und die daraus resultierenden Narben führten zu einer Abminderung der Festigkeitskennwerte $R_{0,01}$, $R_{0,2}$ und R_m um ca. 5 %, wogegen die Verformungskennwerte A_g , $A_{L=50}$ und Z um etwa 50 % abnahmen. Material für Dauerschwingversuche stand nicht zur Verfügung, nach bisheriger Erfahrung läßt sich für derart korrodierte Spanndrähte eine Abnahme der Dauerschwingfestigkeit um ca. 50 % abschätzen.

Brüche traten nur an Spanndrähten auf, die nicht von Verpreßmörtel umgeben waren und so unmittelbar durch Feuchtigkeit (Hochwasser, feine Risse zwischen Mörtel und Beton) beaufschlagt werden konnten. Diese Stähle brachen infolge korrosionsbedingter Querschnittsabminderung. Spannungsrißkorrosionsbrüche wurden nicht festgestellt.

Die nach 28 Jahren noch vorhandene Stahldehnung lag i.M. bei 3,3 %, d.h. 75 % der Vorspannkraft waren noch vorhanden.

Wie hoch die tatsächlichen Verluste aus Spannstahlrelaxation sind, läßt sich nicht angeben, da weder die 1952 aufgebrachte Vorspannung noch die Verluste durch Kriechen und Schwinden des Betons bekannt sind.

4.3. Brücke über die Sagter Ems bei Friesoythe

4.3.1. Angaben zum Bauwerk

Beim Überbau der Brücke handelt es sich um einen zweistegigen Spannbetonplattenbalken, wobei die beiden Stege als 1,6 m breite Hohlkästen ausgebildet sind. Die Fahrbahnplatte ist 21 m lang und 11 m breit und nur in Längsrichtung vorgespannt. In den Bodenplatten der Hohlkästen liegen jeweils 12 Spannglieder des Spannverfahrens Monierbau mit je 100 Mp Tragkraft. In jedes Spannglied sind 8 Lagen zu 6 Spanndrähten des warmgewalzten, vergüteten Spanndrahtes SIGMA-St 145/165 (St 1420/1620), oval-20, gerippt, übereinander eingebaut. Das Hüllrohr besteht aus einem leicht profilierten Blechkasten mit einem dem Spannbündel angepaßten, rechteckigen Querschnitt (vgl. Abb. 37). Einen Eindruck vom Aufbau der Fahrbahnplatte vermittelt Abb. 34.

Im Frühjahr 1974 wurden an den Seitenwänden der Hohlkästen horizontale, dem Spanngliedverlauf entsprechende Risse beobachtet. Bei der anschließenden Untersuchung der Rißursache wurde festgestellt, daß die Spannglieder unzureichend verpreßt und z.T. nur mit einem durchfeuchteten, weichen Verpreßmörtel verfüllt waren. Aufgrund bereits aufgetretener Spanndrahtbrüche und der am Bauwerk getroffenen Abschätzung, daß etwa 40 % der Spanndrähte keinen dauerhaften Korrosionsschutz mehr besaßen, wurde der Ersatz des Bauwerkes durch eine neue Brücke empfohlen, wobei bis zum Abriß nur eine beschränkte Nutzung zugelassen werden sollte.

Der Abbruch erfolgte dann nach insgesamt 25-jähriger Gebrauchsdauer im Frühjahr 1978 mit einer Fallbirne. Die Bruchstücke wurden anschließend mit einem Kran am Ufer der Sagter-Ems abgelagert, weiter zerkleinert und abtransportiert. Einen Eindruck von den Hohlkastenresten, aus denen Spanngliedabschnitte entnommen werden konnten, vermittelt Abbildung 35.

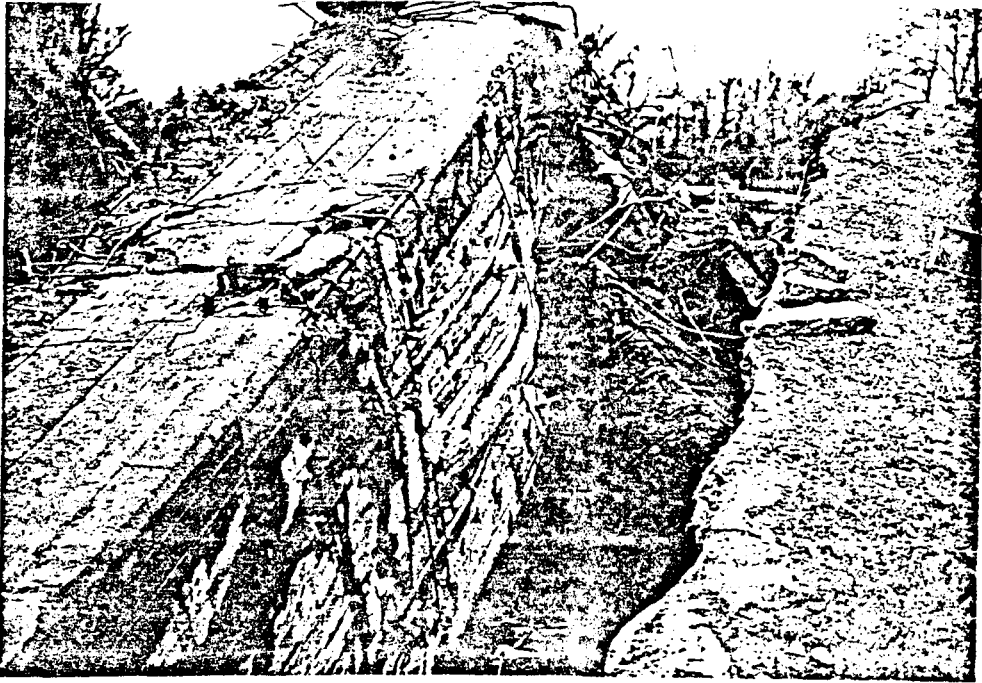


Abb. 35 Hohlkastenbruchstücke aus denen
Spanngliedabschnitte entnommen werden
konnten



Abb. 36 Entnahme von Spanngliedabschnitten aus
den Resten eines Hohlkastens

4.3.2 Beton des Überbaus

Betonbohrkerne (\varnothing 10 cm) aus den Hohlkästenseitenwänden ergaben Druckfestigkeiten zwischen 90 und 98 N/mm². Die Karbonatisierungstiefe war in der Regel kleiner als 2 mm. Die Spannglieder waren daher rundum von einem sehr festen, nicht karbonatisierten Beton umgeben. Da auch die Gehalte an korrosionsfördernden Ionen wie Cl^- und NO_3^- mit je 0,01 % völlig unbedenklich waren, lag außerhalb der Spannglieder voller Korrosionsschutz vor.

4.3.3 Spannglieder und Spannstahl

Die Entnahme der Spannglieder im März 1978 erfolgte unmittelbar nach dem Abbruch an Resten der Hohlkästen mittels einer Trennscheibe (vgl. Abb. 35 u. 36). Jedes Spannglied des Spannverfahrens Monierbau enthielt 48 Einzeldrähte St 145/165 (St 1420/1620), SIGMA-oval 20, gerippt, die in 8 Lagen zu je 6 Drähten übereinander geschichtet waren (vgl. Abb. 37).

4.3.3.1 Zustand der Hüllrohre

Das Hüllrohr bestand aus einem rechteckigen Blechkasten mit leicht gewellten Wänden. Oben wurde ein Deckel aufgesetzt, dessen Falze die Seitenwände ca. 1 cm übergriffen.

In der Regel waren die Hüllrohre von dichtem, nichtkarbonatisiertem und schadstofffreiem Beton umhüllt und daher äußerlich frei von Korrosion (vgl. Abb. 38). Lediglich die von Girlandentrissen (durch Eisdruck entstanden) begleiteten Hüllrohre der Spannglieder an den Seiten der Hohlkästen wiesen im Rißbereich gelegentlich Korrosion auf den Außenflächen auf. Dagegen waren die Hüllrohre auf den Innenseiten immer dann sehr auffällig - auch bis zur Durchrostung - korrodiert, wenn die Verpressung im oberen Querschnitt fehlte und Feuchtigkeit in das Spannglied eingedrungen war. Abb. 39 zeigt den Zustand eines derartigen Hüllrohres von innen, an dem auch noch deutlich die Einfüllhöhe des Verpreßmörtels zu erkennen ist.

4.3.3.2. Verpreßmörtel und Zustand der Verpressung

Dem Verpreßmörtel war - im Gegensatz zu den heute üblichen Verfahren - noch feiner Sand zugesetzt. Der obere Hüllrohrquerschnitt war in der Regel nur unvollständig verpreßt, so daß



Abb. 39 Innenfläche eines Hüllrohres, das nicht vollständig mit Verpreßmörtel gefüllt war, mit Korrosionsfortschritt von innen nach außen

Mörtelproben aus frisch geöffneten Spannkanälen hatten teilweise Feuchtegehalte bis zu 40 Masse-%. Die Gehalte an korrosionsfördernden Ionen wie Cl^- und NO_3^- waren mit 0,04 Masse-% bzw. 0,001 Masse-% vernachlässigbar gering.

Die unvollständige Auspressung der Hüllrohre und die Zermürbung der oberen Verpreßmörtelschicht durch Frosteinwirkung gaben in Verbindung mit den dadurch bereits 1974 hervorgerufenen, zahlreichen Spanndrahtbrüchen den Anlaß zu der Entscheidung für den Abbruch des Bauwerks im Jahre 1978.

4.3.3.3 Ordnung im Hüllrohr

Durch den Einbau zahlreicher Abstandskämme ließ sich in der Regel eine vergleichsweise gute Parallelführung der 48 Spanndrähte in den Spanngliedern erreichen. Die Abstände der Einzeldrähte untereinander hätte bei guter Verpressung eine vollständige Umhüllung der Drähte mit Mörtel zugelassen. Abbildung 40 zeigt den Schnitt durch ein Spannglied, in dem deutlich die unvollständige Verpressung im oberen Querschnitt zu erkennen ist.

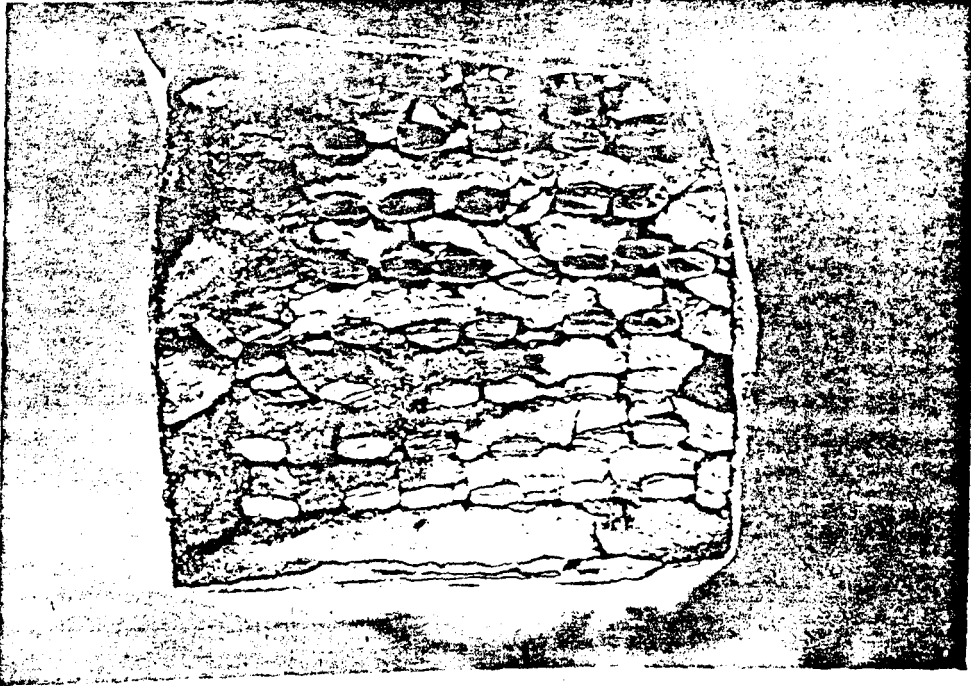


Abb. 40 Querschnitt durch ein entnommenes Spannglied. Im oberen Querschnittsbereich unvollständige Ausfüllung mit Verpreßmörtel. Die vielen Risse im Mörtel sind beim Schneiden entstanden

4.3.3.4 Zustand des Spannstahls

Der eingebaute, warmgewalzte und vergütete Spanndraht St 145/165 (St 1420/1620) SIGMA-oval 20, gerippt, ließ sich nach dem Ausbau grob in drei Klassen einteilen:

- Spanndrähte ohne erkennbare Oberflächenkorrosion aus dem unteren, einwandfrei ausgepreßten Hüllrohrquerschnitt,
- Spanndrähte mit deutlich erkennbaren Korrosionsangriffen auf der Stahloberfläche, aus der oberen, zermürbten Verpreßmörtelschicht,
- Spanndrähte aus dem oberen, unverpreßten Hüllrohrquerschnitt, die völlig verrostet und z.T. schon gebrochen waren.

Im statischen Zugversuch ergaben sich folgende mechanisch-technologischen Gütekennwerte:

Material	$R_{p0,01}$ N/mm ²	$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	$A_{L=50}$ %
korrosionsfrei	1360	1490	1660	8
Korrosionsnarben bis 300 µ tief	1360	1470	1590	7
völlig verrostet	1320	1440	1580	6
Überwachung 1952	1340	1520	1650	8

Ein Vergleich mit den Versuchswerten von 1952 zeigt, daß korrosionsfreie Drähte aus Bereichen einwandfreier Verpressung auch nach 25-jähriger Verweilzeit im Bauwerk keine Veränderung erfahren haben. Bei korrodierten Materialien nahmen die Festigkeitswerte um etwa 5 %, die Bruchdehnung um etwa 25 % gegenüber den Ursprungswerten ab.

Vor der Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit wurden die korrodierten Proben eingehend auf Narbentiefen untersucht. Die Narbentiefen von Proben aus zermürbtem Verpreßmörtel der oberen Mörtelschichten lagen zwischen 60 und 320 µ, wobei sich die mittlere Narbentiefe zu 200 µ ergab. Die Dauerschwingfestigkeit der völlig verrosteten Proben aus den unverpreßten Hüllrohrabschnitten wurde nicht ermittelt.

Einen Eindruck vom Zustand der Proben aus dem Übergangsbereich "einwandfreier-zermürbter Verpreßmörtel" vermitteln die Abbildungen 41 und 42. Hier finden sich sowohl korrosionsfreie wie korrodierte Proben, wobei korrodierte Proben das o.g. Narbentiefenspektrum aufwiesen. Den Oberflächenzustand eines als korrosionsfrei klassifizierten Spanndrahtes zeigt bei ca. 10-fache Vergrößerung Abbildung 43. In den Abbildungen 44 - 47 sind die Oberflächen korrodierter Proben, jeweils vor und nach dem Ablösen der Korrosionsprodukte bei gleicher Vergrößerung wie bei Abb. 43 dargestellt.



Abb. 41 Zustand ausgebauter Spanndrähte einer horizontalen Lage aus dem Übergangsbereich "einwandfreier - zermürbter Verpreßmörtel". Durch Unordnung enthält diese Lage zufällig 7 statt 6 Drähte

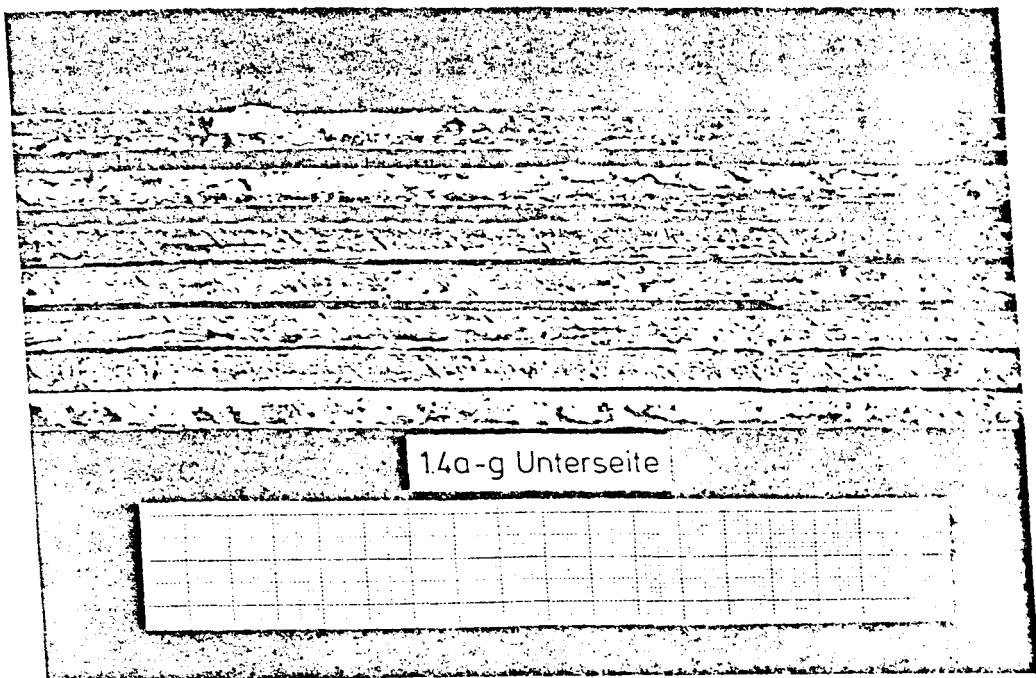


Abb. 42 Gleiche Spanndrähte wie in Abb. 41, jedoch von der Unterseite

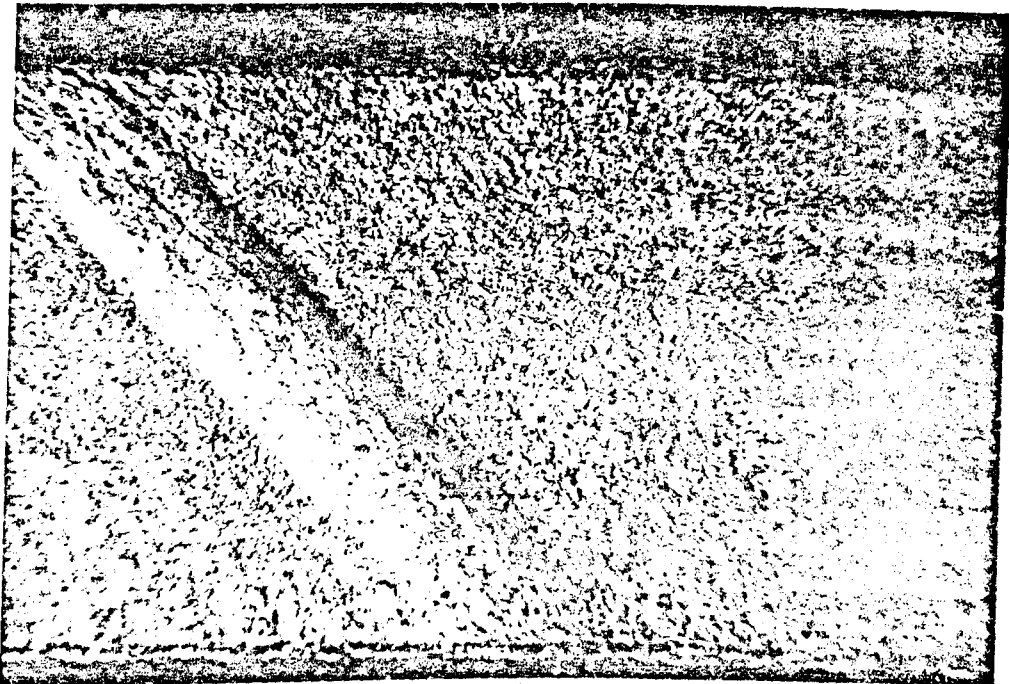


Abb. 43 Spannstahloberfläche eines als korrosionsfrei klassifizierten Spannstahls aus einem einwandfrei verpreßten Hüllrohrabschnitt (V ~ 10x)



Abb. 44 Spannstahloberfläche mit Korrosionsprodukten, entnommen aus zermürbtem Verpreßmörtel ($V \sim 10x$)

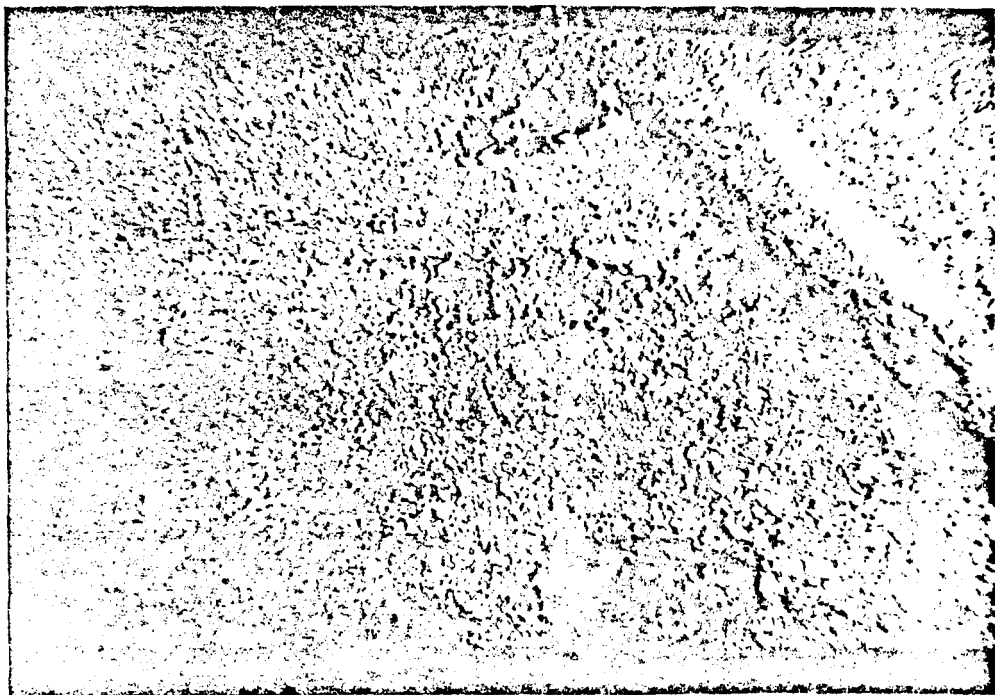


Abb. 45 Spannstahloberfläche der Abb. 44 nach Ablösen der Korrosionsprodukte. Die Tiefe der auffälligen Narben liegt zwischen 250μ und 310μ ($V \sim 10x$)

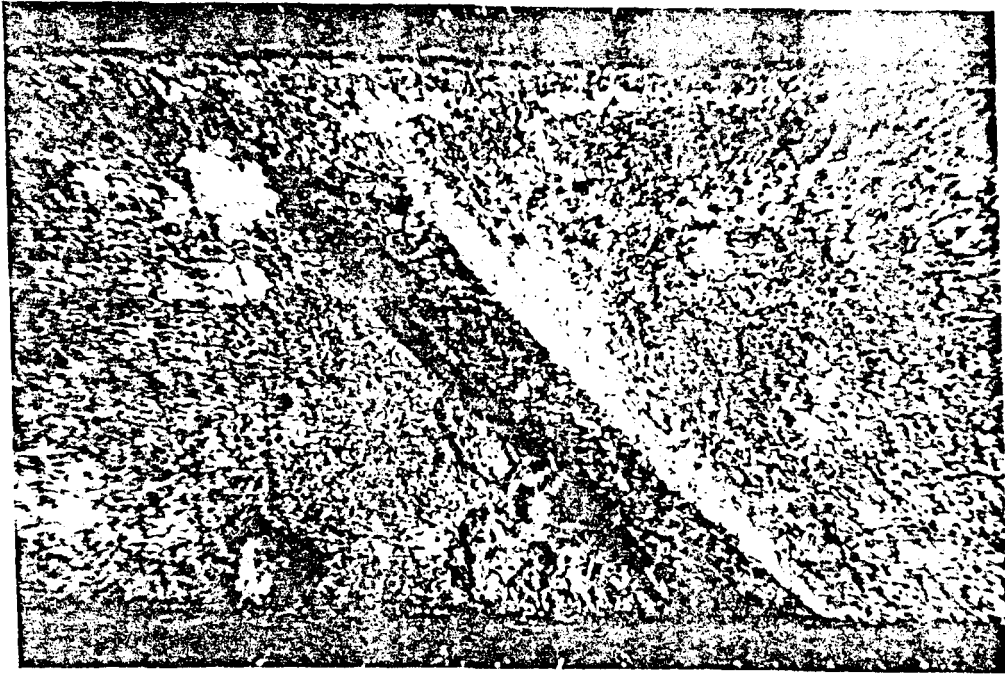


Abb. 46 Spannstahloberfläche mit Korrosionsprodukten
entnommen aus zermürbtem Verpreßmörtel
(V ~ 10x)

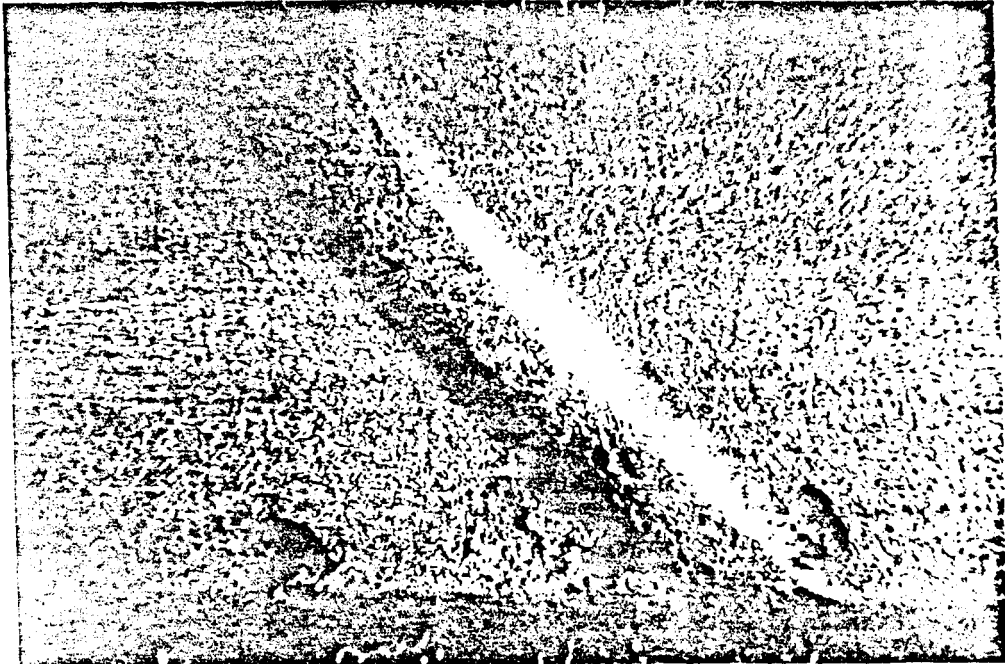


Abb. 47 Spannstahloberfläche der Abb. 46 nach
Ablösen der Korrosionsprodukte. Die
Tiefe der Narben liegt zwischen 230 μ
und 320 μ (V ~ 10x)

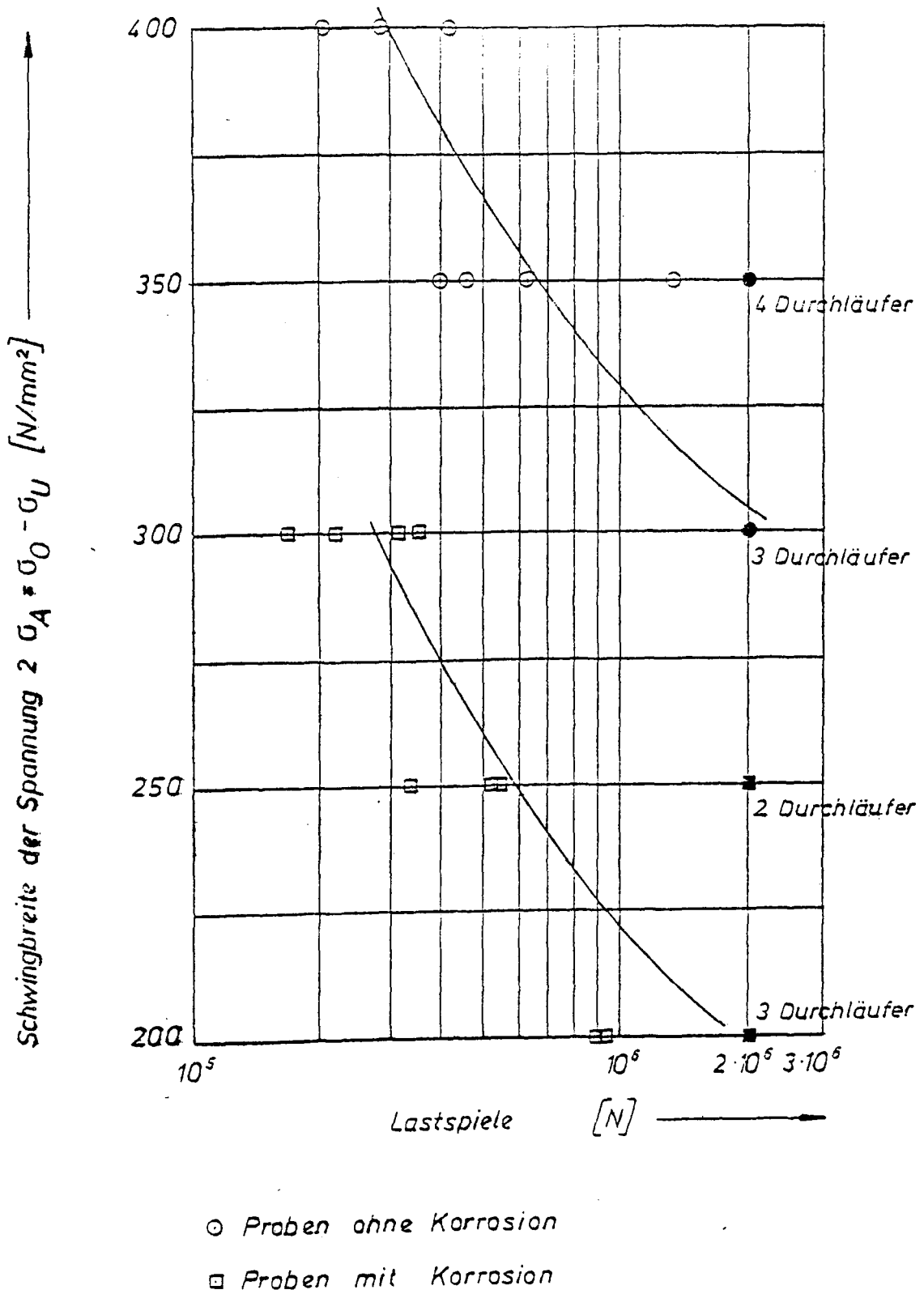


Abb. 48 Ergebnisse der Dauerschwingversuche korrosionsfreier und korrodierter Spannstahlproben. Die korrodierten Proben wiesen auf ihren Oberflächen punktförmige Narben mit Tiefen zwischen 60µ und 320µ auf

Das Ergebnis der Dauerschwingversuche ist in den beiden Wöhlerkurven korrosionsfreier und korrodierten Proben der Abb. 48 dargestellt. Aus den Kurvenverläufen ergibt sich eine Differenz der Dauerschwingfestigkeit zwischen korrodierten und unkorrodierten Spanndrähten von mehr als 100 N/mm^2 , was einer Abminderung um etwa 40 - 50 % entspricht.

Eine mikroskopische Untersuchung der Dauerbruchflächen ergab, daß bei den korrosionsfreien Proben nur in einem Fall eine Narbe (Tiefe $\sim 45 \mu$) am Bruchausgang vorlag. Bei den korrodierten Proben gingen die Dauerbrüche grundsätzlich von kleinen Narben aus, wie sie in Abb. 44 - 47 dargestellt sind. Die Narbentiefen an den Bruchausgängen von Dauerbrüchen korrodierten Proben lagen zwischen 70 und 260μ . Ein Zusammenhang zwischen Narbentiefe und Lastspielzahl - bei vorgegebener Schwingbreite - konnte nicht festgestellt werden. Die Abbildungen 49 - 52 zeigen bei ca. 10- bzw. 80-facher Vergrößerung Dauerbruchflächen und die den Bruch auslösenden Narben von korrodierten Proben.

Die an den Spannstählen im Bauwerk noch vorhandene Restvorspannung wurde an Drähten in einwandfrei verpreßten Hüllrohrabschnitten vor den Abbrucharbeiten mittels aufgeklebter Dehnungsmeßstreifen ermittelt. Für die Messung wurden jeweils auf Drahtober- und -unterseite ein Meßstreifen geklebt. Zur Auswertung wurden die Meßsignale vor und nach dem Trennen des Drahtes gemittelt. Es ergaben sich Stahldehnungen von 3,3 - 3,5 ‰, was einer mittleren Restvorspannung von etwa 700 N/mm^2 entspricht.

4.3.3.5. Zusammenfassende Wertung zum Langzeitverhalten der Spanndrähte aus der Brücke über die Sagter-Ems bei Friesoythe

In der Brücke über die Sagter-Ems bei Friesoythe waren die Spanndrähte aus St 145/165 (St 1420/1620), SIGMA-oval 20, gerippt, während der 25-jährigen Nutzungsdauer des Bauwerks den Umgebungsbedingungen "einwandfrei verpreßt", "umgeben mit zermürbtem, feuchten und größtenteils noch alkalischen Verpreßmörtel" sowie "unverpreßt mit teilweise Feuchtezutritt" ausgesetzt. Korrosionsfördernde Ionen wie Cl^- spielten keine Rolle.

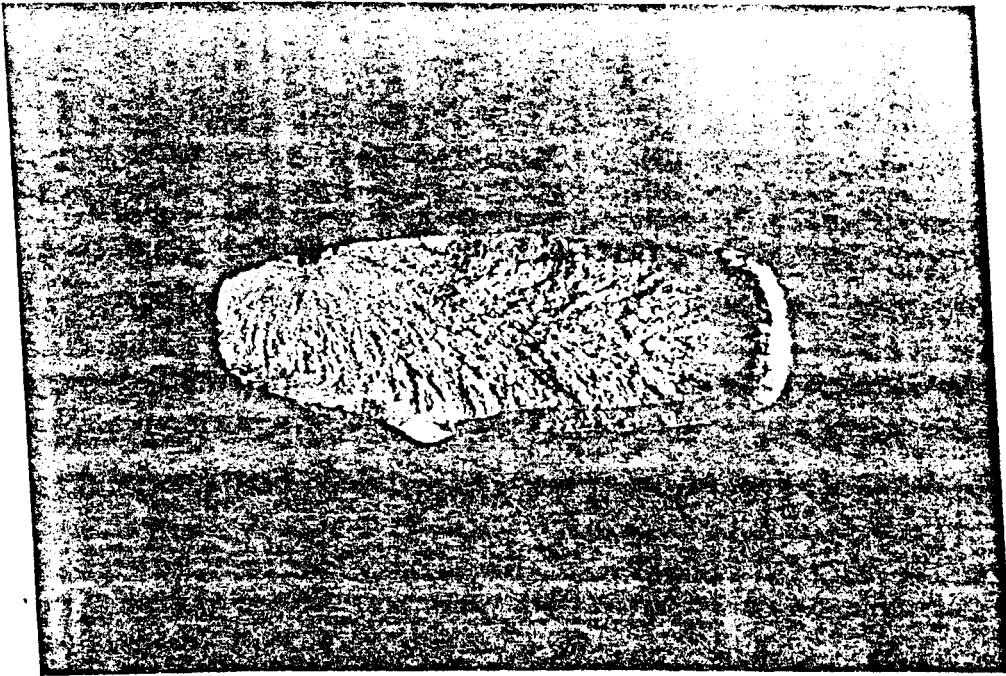


Abb. 49 Dauerbruchfläche ($V \sim 10\times$) eines korrodierten Stahls mit Narbe am Bruchausgang (vgl. Abb. 50)

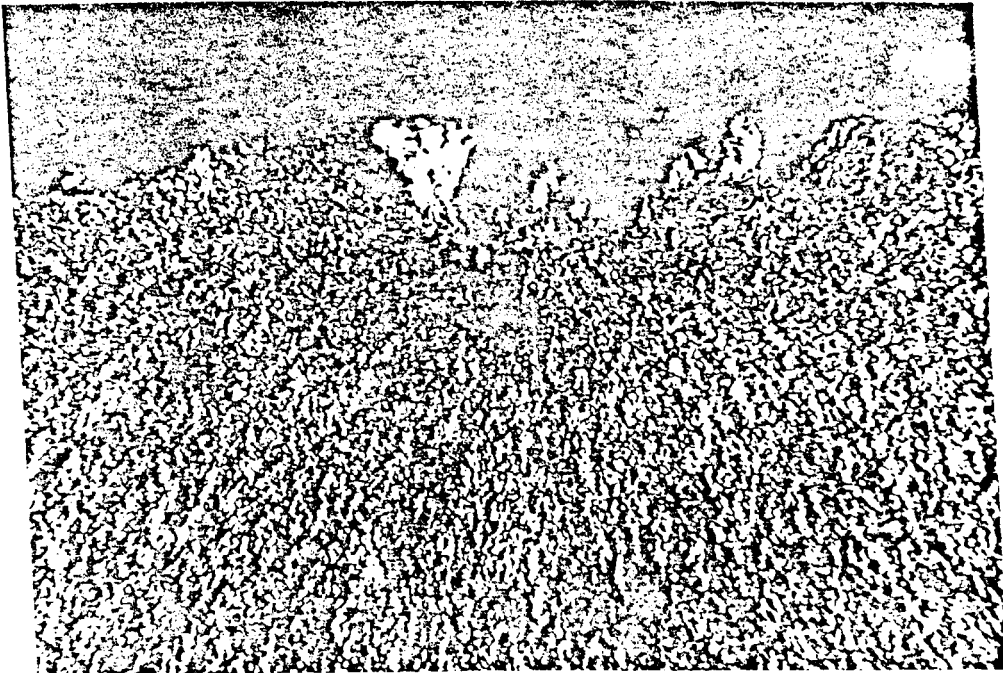


Abb. 50 Narbe (Tiefe $\sim 220\ \mu$) am Bruchausgang der Bruchfläche von Abb. 49 ($V \sim 80\times$)

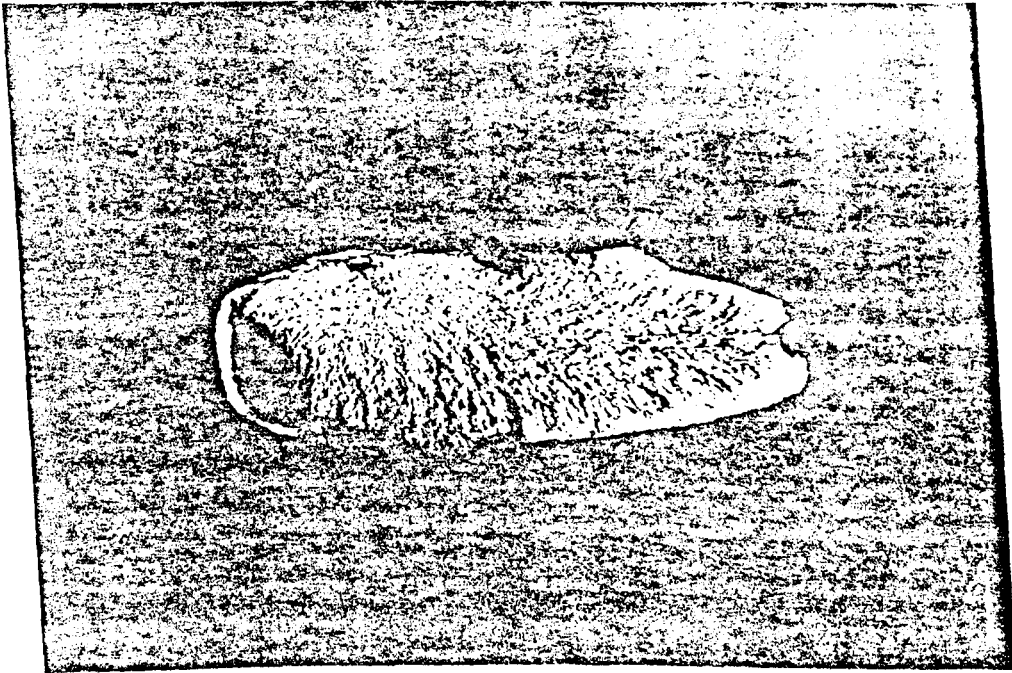


Abb. 51 Dauerbruchfläche ($V \sim 10\times$) eines korrodierten Stahls mit Narbe am Bruchausgang (vgl. Abb. 52)

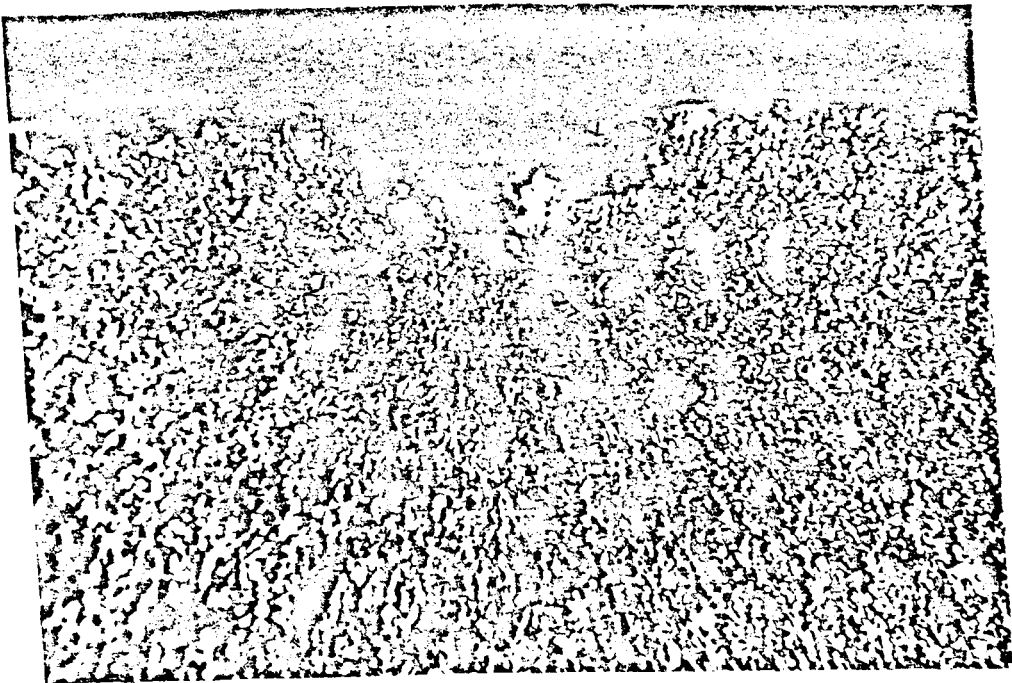


Abb. 52 Narbe (Tiefe $\sim 240\ \mu$) am Bruchausgang der Bruchfläche von Abb. 51 ($V \sim 80\times$)

Bei den Spanndrähten aus einwandfrei verpreßten Hüllrohrbereichen konnten weder optisch noch meßtechnisch (Zugversuch, Dauerschwingversuch) Abminderungen der Gütekennwerte festgestellt werden.

Spannstahlproben aus zermürbten, feuchten aber größtenteils noch alkalischen Mörtelbereichen wiesen einen deutlichen Korrosionsangriff in Form kleiner Narben mit Tiefen zwischen $60\text{ }\mu$ und $320\text{ }\mu$ auf. Diese Narben setzten die Dauerschwingfestigkeit um etwa 40 - 50 % herab. Die Festigkeitskennwerte waren nur unwesentlich um etwa 3 - 5 %, die Bruchdehnung jedoch um etwa 10 - 20 % abgemindert.

Spannstahlproben aus völlig unverpreßten Hüllrohrabschnitten hatten bei Feuchtezufuhr erhebliche korrosive Querschnittseinbußen erlitten, die bereits häufig zu Brüchen geführt hatten. Stark verrostete Proben, deren Querschnittsabmessungen jedoch im wesentlichen noch erhalten waren, zeigten Abminderungen in den Festigkeitswerten um ca. 5 % und in der Bruchdehnung um 25 %. Die Dauerschwingfestigkeit derartig korrodierter Proben wurde nicht ermittelt.

Restvorspannungsmessungen an Drähten in vollständig verpreßten Hüllrohrabschnitten ergaben Werte um 700 N/mm^2 . Unter der Voraussetzung, daß beim Bau eine planmäßige Vorspannung von $0,55 R_m$ aufgebracht wurde, bedeutet das eine Abnahme der Vorspannung in 25 Jahren um 20 - 25 % durch Relaxation sowie Kriechen und Schwinden. Bei der Bewertung dieser Angaben sind jedoch die Meßunsicherheiten bei Vorspannungsmessungen am Bauwerk sowie die Unkenntnis über die tatsächlich aufgebrachte Vorspannung zu beachten.

4.4 Brücke OL 51 über den Verschiebebahnhof Oldenburg/Ostenburg im Zuge der B75/BAB A28

4.4.1 Angaben zum Bauwerk

Das Bauwerk wurde 1953 errichtet und überbrückte die Gleisanlagen des Verschiebebahnhofs Oldenburg/Ostenburg als 76 m lange, vierfeldrige Plattenbrücke. In die Platten waren als Verdrängungskörper leere Ölfässer eingebaut. Einen Querschnitt durch die Brückenplatte mit der Lage der Verdrängungskörper und der Spannbewehrung zeigt Abb. 53.

Die Längs- und Quervorspannung bestand aus Spanngliedern vom Typ Freyssinet, in denen jeweils 12 warmgewalzte, vergütete Spanndrähte St 145/165 (St 1420/1620), rund, glatt, $\varnothing 5,2$ mm um eine Drahtspirale herum angeordnet waren (vgl. Abb. 60 und 61).

Im Zuge des Ausbaus der Südumgehung Oldenburg zur BAB A28 wurde das Bauwerk im Sommer 1978 abgebrochen und stand dabei für Probenentnahmen zur Verfügung. Zum Zeitpunkt der Probenentnahme war das Bauwerk demnach 25 Jahre alt. Der Abbruch erfolgte durch Auftrennen der Fahrbahnplatte längs der eingebauten Verdrängungskörper (Ölfässer) in einzelne Längsträger (vgl. Abb. 54) ., die dann mittels eines Kranes abgehoben werden konnten. Dieses vergleichsweise aufwendige Verfahren mußte wegen des unter der Brücke liegenden DB-Geländes gewählt werden.

4.4.2 Beton des Überbaus

Bohrkerne zur Druckfestigkeitsbestimmung konnten nicht entnommen werden. Laut statischer Berechnung wurde für den Überbau ein Beton mit 300 kg/m^3 Zement verwendet, der nach 28 Tagen eine Würfelfestigkeit von $22,5 \text{ N/mm}^2$ aufweisen sollte. Die Betonfärbung beim Abbruch ließ auf die Verwendung von HOZ schließen. Nach Auskunft des Abbruchunternehmens und auch aus eigener Anschauung war der Beton sehr fest und wies keine auffälligen Verdichtungsmängel auf.

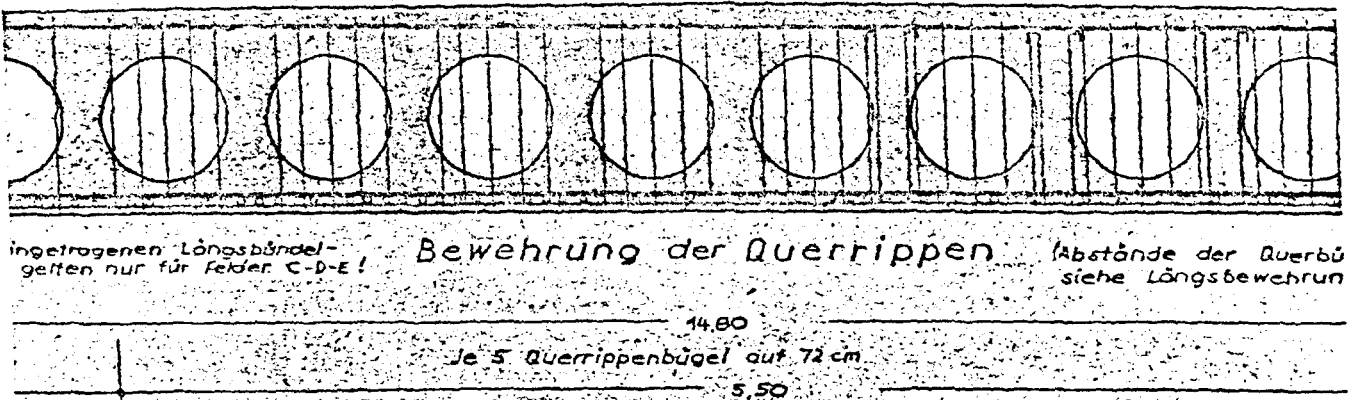
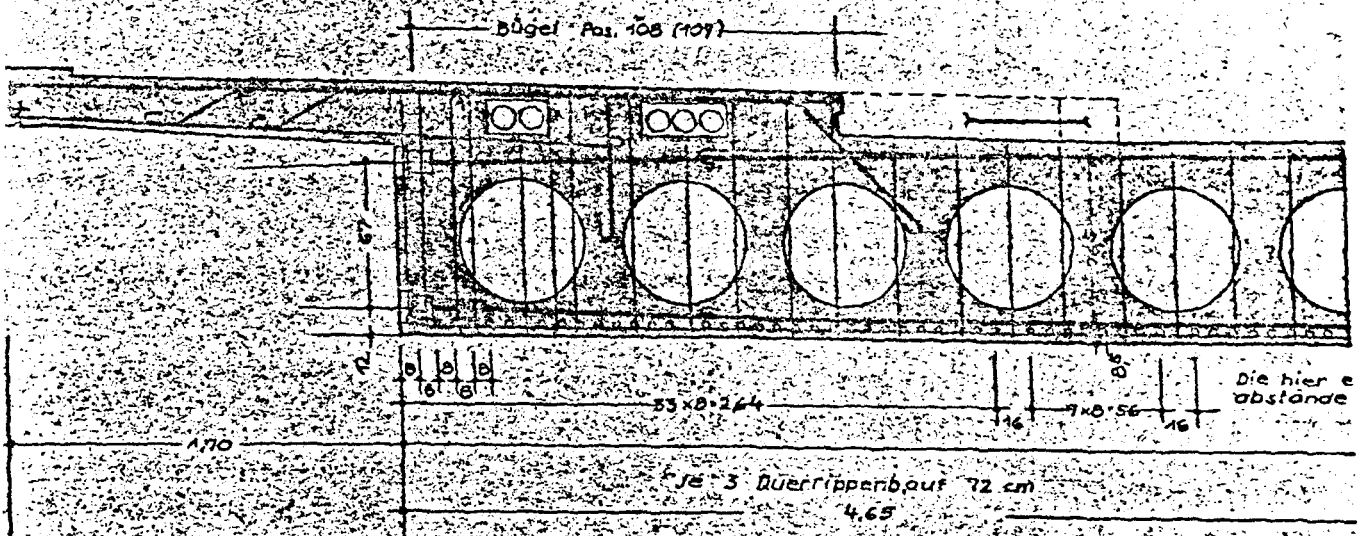
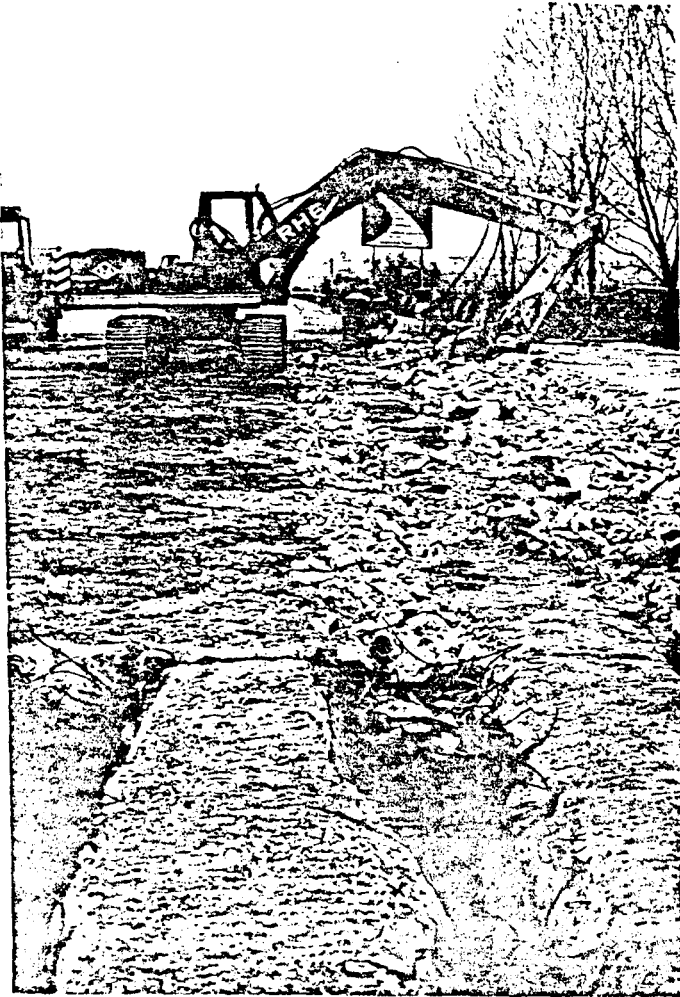


Abb. 53 Schnitt durch die Fahrbahnplatte des Brückenbauwerks
OL 51

Abb. 54

Abbruch des Brückenbau-
bauwerkes OL 51 durch
Trennen der Fahrbahnplatte
entlang der Hohlkörper in
Längsstreifen



Der Cl-Gehalt von Betonproben aus Fahrbahnplattenober- und -unterseite lag bei 0,07 - 0,08 Masse-% des Zementgehaltes und damit weit unterhalb der zulässigen Cl-Konzentration. Auf der Fahrbahnplattenoberseite konnte keine Karbonatisierung festgestellt werden (Brückenabdichtung und Asphalt hatten offenbar den CO_2 -Zutritt verhindert), die Seiten- und Unterflächen waren nicht zugänglich.

4.4.3 Spannglieder und Spannstahl

Als Längs- und Quervorspannung waren Spannglieder des Typs Freyssinet-Wayss und Freytag eingebaut. In ein seitlich längs gefalztes, glattes Blechhüllrohr waren um eine Drahtspirale herum 12 Spanndrähte der Güte St 145/165 (St 1420/1620 warmgewalzt, vergütet, rund, glatt, \varnothing 5,2 mm) parallel eingezogen (vgl. Abb. 60 und 61).

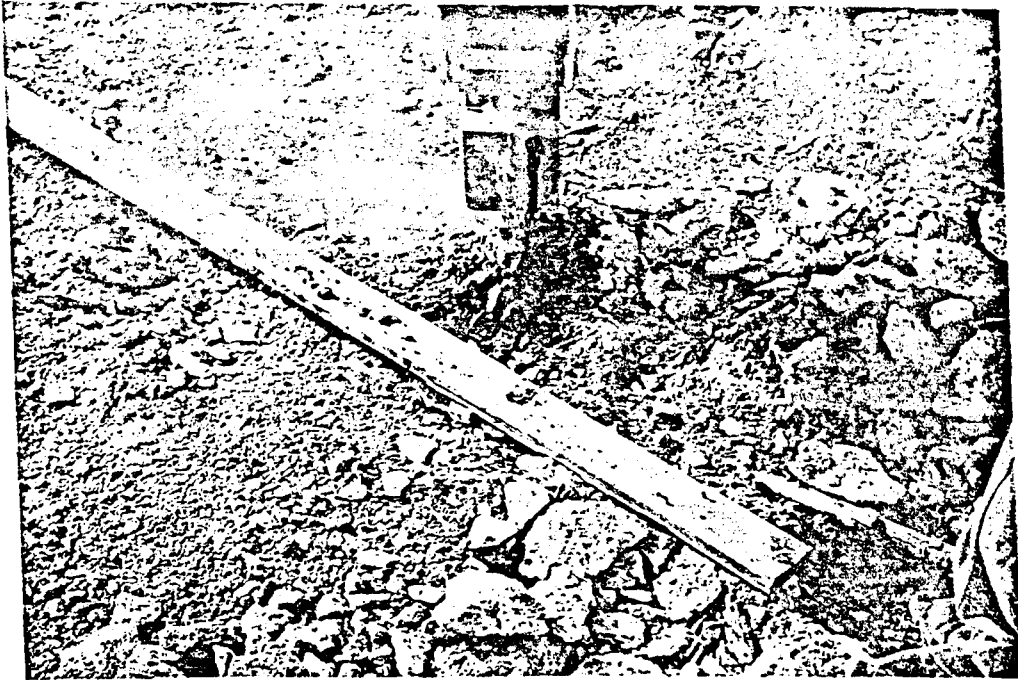


Abb. 55 Freilegen eines Querspanngliedes durch Einsatz schwerer Stemmgeräte



Abb. 56

Letztes "Handanlegen"
vor der Spannglied-
entnahme

Durch Vermittlung des Straßenbauamtes Oldenburg-West konnte unter Mithilfe des Abbruchunternehmens ein ca. 3,5 m langer Abschnitt eines Querspanngliedes aus der Fahrbahnplattenoberseite herausgestemmt werden (vgl. Abb. 55 und 56). Außerdem wurde ein etwa gleichlanges Stück eines nicht vollständig verpreßten Längsspanngliedes aus einem Längstrennschlitz der Fahrbahnplatte herausgetrennt

4.4.3.1 Zustand der Hüllrohre

Die Hüllrohre bestanden aus etwa 0,7 mm dickem Blech und besaßen seitlich einen Längsfalz. Der Innendurchmesser betrug ca. 30 mm. Das Hüllrohr des entnommenen Querspanngliedabschnittes war außen (vgl. Abb. 57) und innen metallisch blank. Das entnommene Längsspannglied war äußerlich angerostet, was zweifellos von der ca. 2 - 3-wöchigen Freilagerung während des Abbruchs herrührte. Die Innenflächen dieses teilverpreßten Hüllrohres wiesen bereichsweise festsitzenden Oberflächenrost auf, eine Durchrostung hatte jedoch nicht stattgefunden, da offenbar kein nennenswerter Feuchtigkeit Zutritt von außen möglich war.

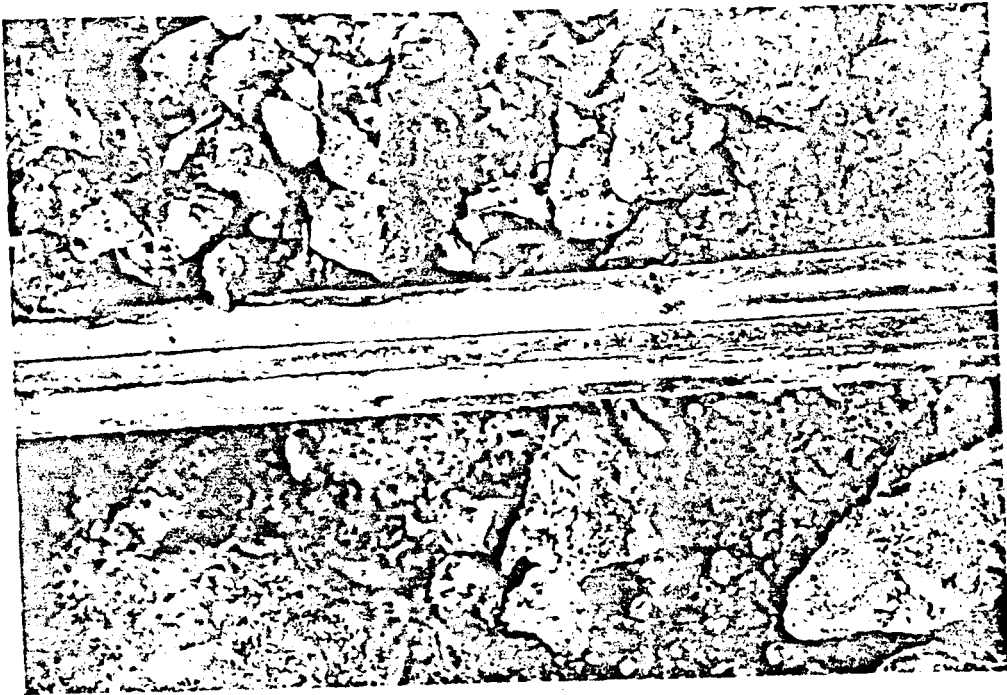


Abb. 57 Metallblankes Hüllrohr des entnommenen Querspanngliedes



Abb. 58 Verpreßmörtelkern des Querspanngliedes
mit Rostabdrücken (Vergrößerung ca. 2x)
längs der Zwickel und an der Drahtspirale

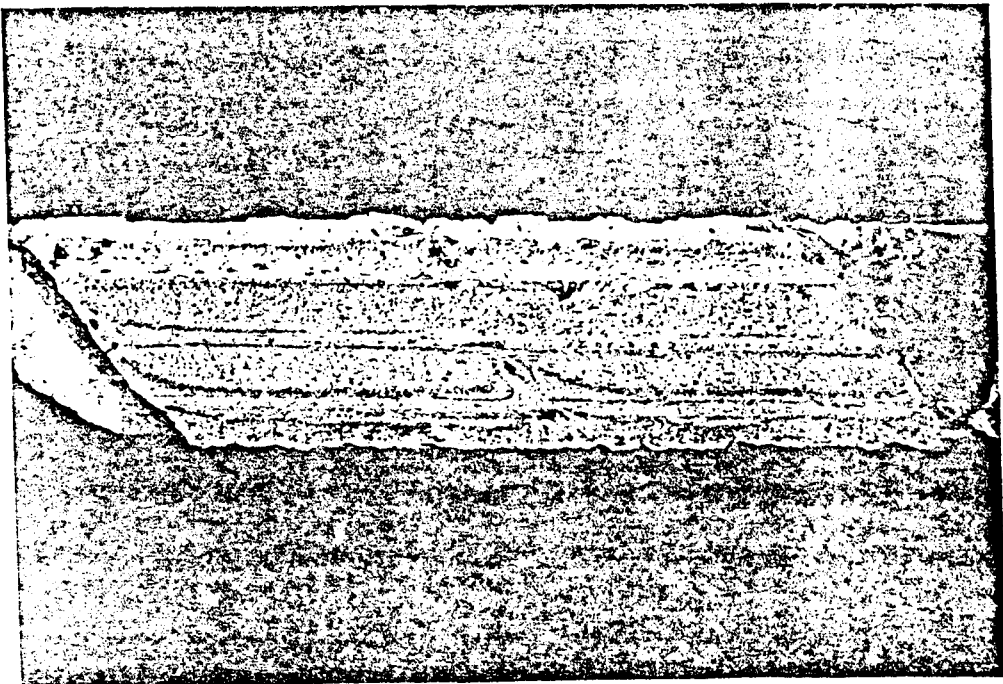


Abb. 59 Verpreßmörtelkern des Querspanngliedes
mit Rostabdrücken (Vergrößerung ca. 2x)
längs der Zwickel und an der Drahtspirale

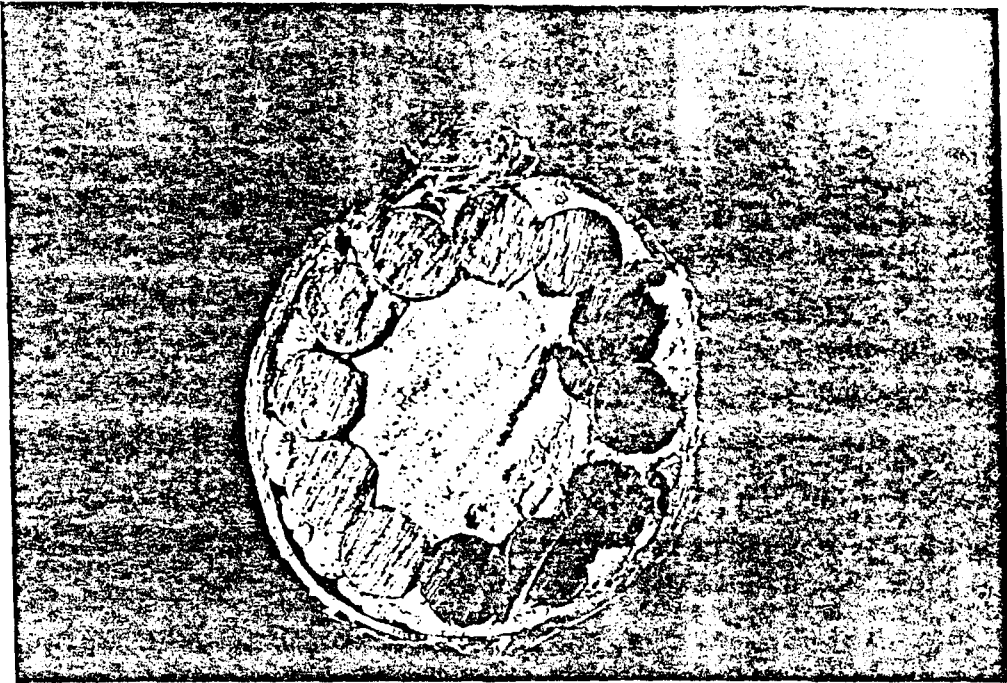


Abb. 60 Querschnitt durch das vollständig verpreßte Querspannglied ($V \sim 2$ -fach)

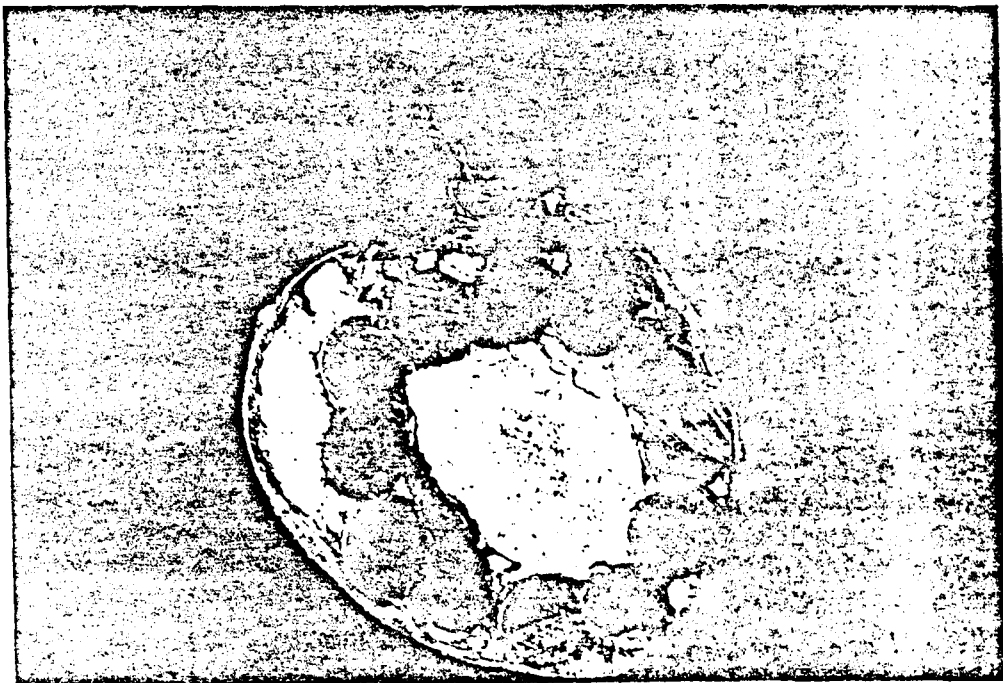


Abb. 61 Wie Abb. 60, jedoch ca. 2 m von der ersten Schnittstelle entfernt ($V \sim 2$ -fach)

4.4.3.2 Verpreßmörtel und Zustand der Verpressung

Das entnommene Querspannglied war mit Zementschlempe einwandfrei verpreßt, irgendwelche auffälligen Verpreßmängel wie größere Blasen oder längere Hohlräume wurden nicht entdeckt. Die Abbildungen 58 und 59 zeigen jedoch anhand linienförmiger Rostabdrücke, daß trotz einwandfreier Verpressung in den Zwickeln zwischen den einzelnen Drähten grundsätzlich die Möglichkeit einer Korrosion zu bestehen scheint. Auch die Berührungspunkte zwischen Drahtspirale und Spanndrähten zeichnet sich im Verpreßmörtelkern durch deutliche Braunfärbung ab. Da der Zustand der Spannstähle beim Verpressen nicht bekannt ist, kann andererseits natürlich nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, daß sowohl die linien- als auch die punktförmigen Braunfärbungen Abdrücke von Oberflächenkorrosion sind, die infolge Schwitzwassereinfluß vor dem Verpressen entstanden war.

Ein Korrosionsangriff infolge Cl-Einwirkung war auszuschließen, da der Cl-Gehalt des Verpreßmörtels unter 0,01 Masse-% lag.

Das entnommene Längsspannglied war auf der gesamten Länge unvollständig verpreßt. Der Querschnitt war schätzungsweise zu 50 % mit Mörtel gefüllt, genauere Angaben darüber, wie sich der Mörtel im Hüllrohr verteilt hatte, sind nicht möglich, da das Spannglied durch die Abbrucharbeiten beträchtlich in Mitleidenschaft gezogen war. Angemerkt werden soll außerdem, daß aus den Längsspanngliedern gezielt ein teilverpreßtes für die Untersuchungen ausgewählt worden war.

4.4.3.3 Ordnung im Hüllrohr

Sowohl im entnommenen Längs- als auch im Querspannglied war es gelungen, durch die eingelegte Drahtspirale die geplante Ordnung im Hüllrohr zu erreichen. Einen Eindruck von der Spannstahlanordnung an zwei unterschiedlichen Querschnitten des Querspanngliedes vermitteln die Abbildungen 60 und 61. Diese beiden Bilder zeigen aber auch - trotz der hier vollständigen Ausfüllung des Querschnitts mit Verpreßmörtel - wie schwierig es u.U. sein kann, alle Querschnittsbereiche mit Verpreßmörtel zu erreichen.

4.4.3.4 Zustand des Spannstahls

Der eingebaute warmgewalzte und vergütete Spanndraht, rund, glatt, \varnothing 5,2 mm, St 145/165 (St 1420/1620) besaß nach noch vorhandenen Unterlagen des Herstellers seinerzeit folgende Gütekennwerte:

$$R_{p0,2} = 1490 - 1550 \text{ N/mm}^2, R_m = 1620 - 1690 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{L=50} = 7 - 9 \text{ \%}.$$

Die Spanndrähte aus den Quer- bzw. Längsspanngliedern ließen sich nach Augenschein grob in zwei Klassen einteilen:

- Spanndrähte ohne erkennbare Oberflächenkorrosion aus dem einwandfrei verpreßten Querspannglied,
- Spanndrähte mit deutlich erkennbarem Korrosionsangriff auf der Drahtoberfläche aus dem unvollständig verpreßten Längsspannglied.

Einen Eindruck vom Oberflächenzustand derartiger Drähte vermitteln die Abbildungen 62 - 64 bei etwa 10-facher Vergrößerung.

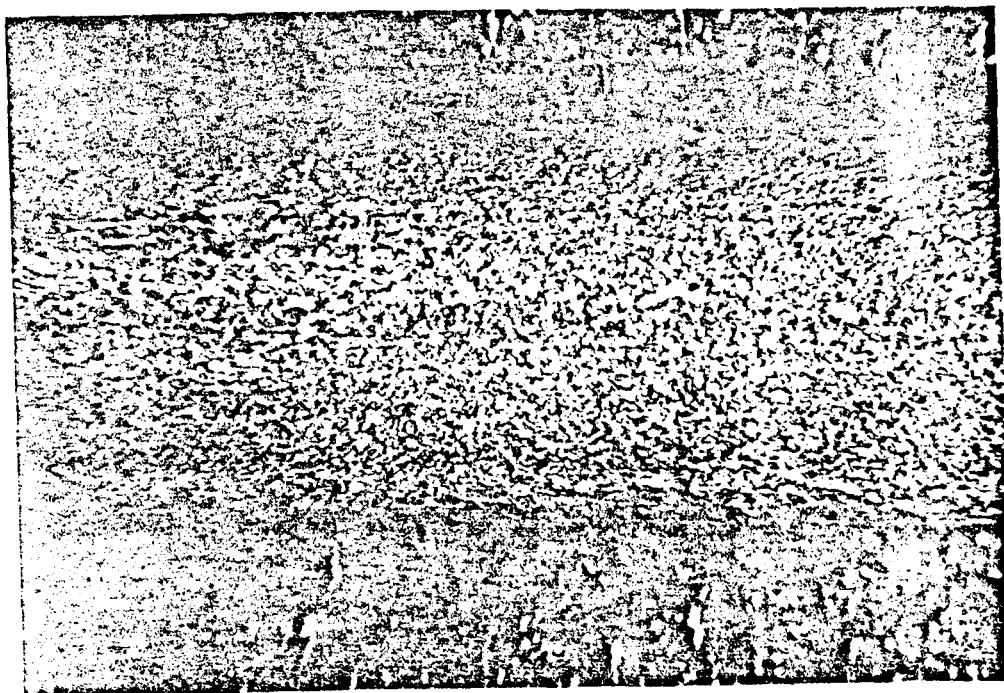


Abb. 62 Oberflächenzustand eines Spanndrahtes aus dem einwandfrei verpreßten Querspannglied bei etwa 10-facher Vergrößerung

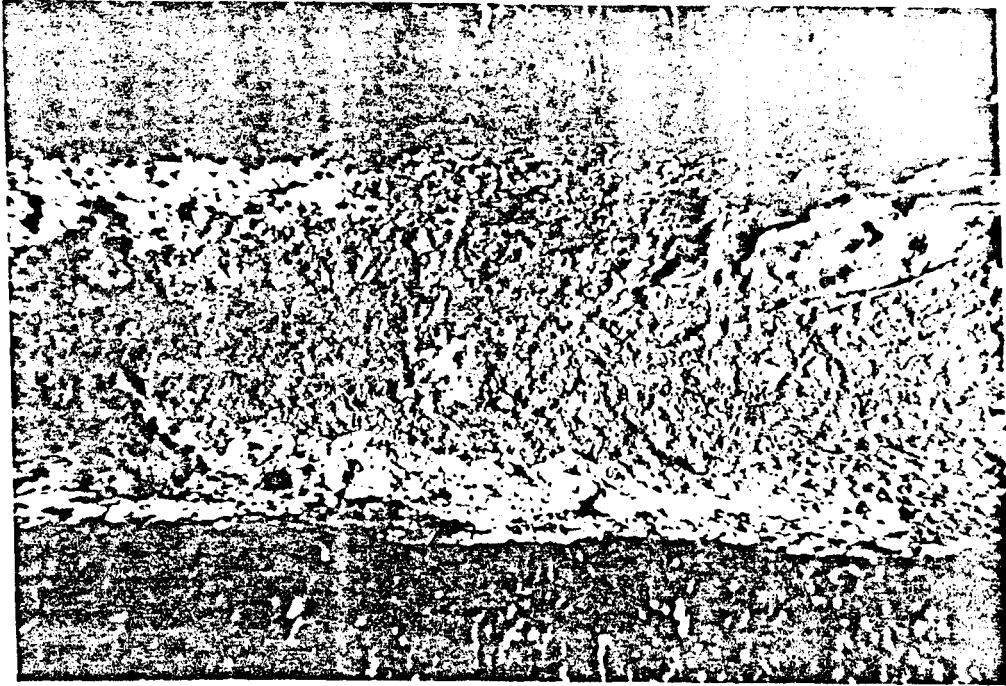


Abb. 63 Oberflächenzustand eines Spanndrahtes aus dem unvollständig verpreßten Längsspannglied (V ~ 10-fach)

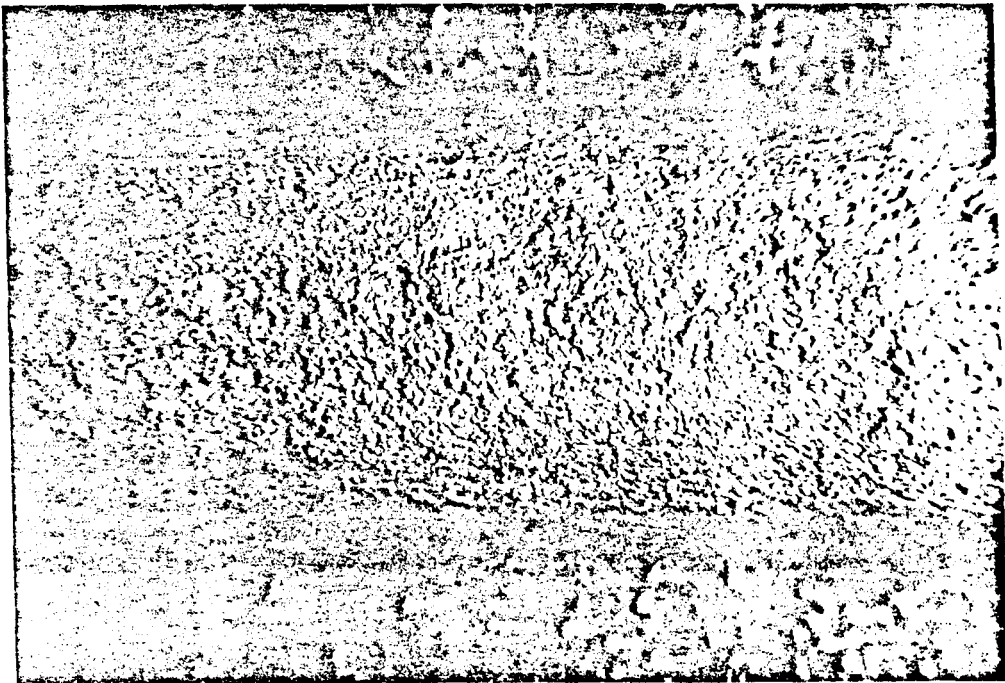


Abb. 64 Die gleiche Probe wie in Abb. 63, jedoch nach Ablösen der Korrosionsprodukte und Mörtelreste. Narbentiefen ~ 20 - 120 μ (V ~ 10-fach)

In den statischen Zugversuchen ergaben sich folgende Festigkeits- und Verformungskennwerte:

Material aus	$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	$A_{L=50}$ %
Querspannglied (verpreßt) vereinzelte Narben 20-60 µ tief	1490	1620	8,4
Längsspannglied (teilverpreßt) viele Narben 20-120 µ tief	1530	1630	6,8
Güteüberwachung zur Bauzeit	1490- 1550	1620- 1690	7-9

Eine Abnahme der Festigkeitskennwerte ist weder bei den optisch einwandfreien Proben aus dem verpreßten Querspannglied mit ganz vereinzelteten, zwischen 20µ und 60µ tiefen Narben noch bei den oberflächlich deutlich angerosteten Proben aus dem unvollständig verpreßten Längsspannglied mit dicht nebeneinanderliegenden, zwischen 20 und 120µ tiefen Narben eingetreten.

Die Bruchdehnung zeigt dagegen zwischen den korrosionsfreien bzw. verrosteten Proben bereits einen Abfall um etwa 20 %
(Einzelwerte "blank" in %: 8.0, 8.0, 9.0, 8.0, 9.0.

Einzelwerte "rostig" in %: 6.0, 7.0, 7.0, 7.0, 7.0.)

Das Ergebnis der Dauerschwingversuche ist in den Wöhlerkurven der Abb. 65 zusammengefaßt. Die Differenz in der Schwingbreite zwischen korrosionsfreien und angerosteten Stahlproben mit Narbentiefen zwischen 20µ und 120µ beträgt etwa 100 N/mm², was einer Abminderung von etwa 30 % entspricht. Bei einer mikroskopischen Auswertung der Dauerbruchflächen ergab sich, daß die Dauerbrüche aller rostigen Drahtproben (viele, dicht bei einanderliegende Narben zwischen 20 und 120µ) von Rostnarben ausgingen, deren Tiefen zwischen 60µ und 120µ lagen. Die mittlere Narbentiefe betrug bei diesen Narben 100µ.

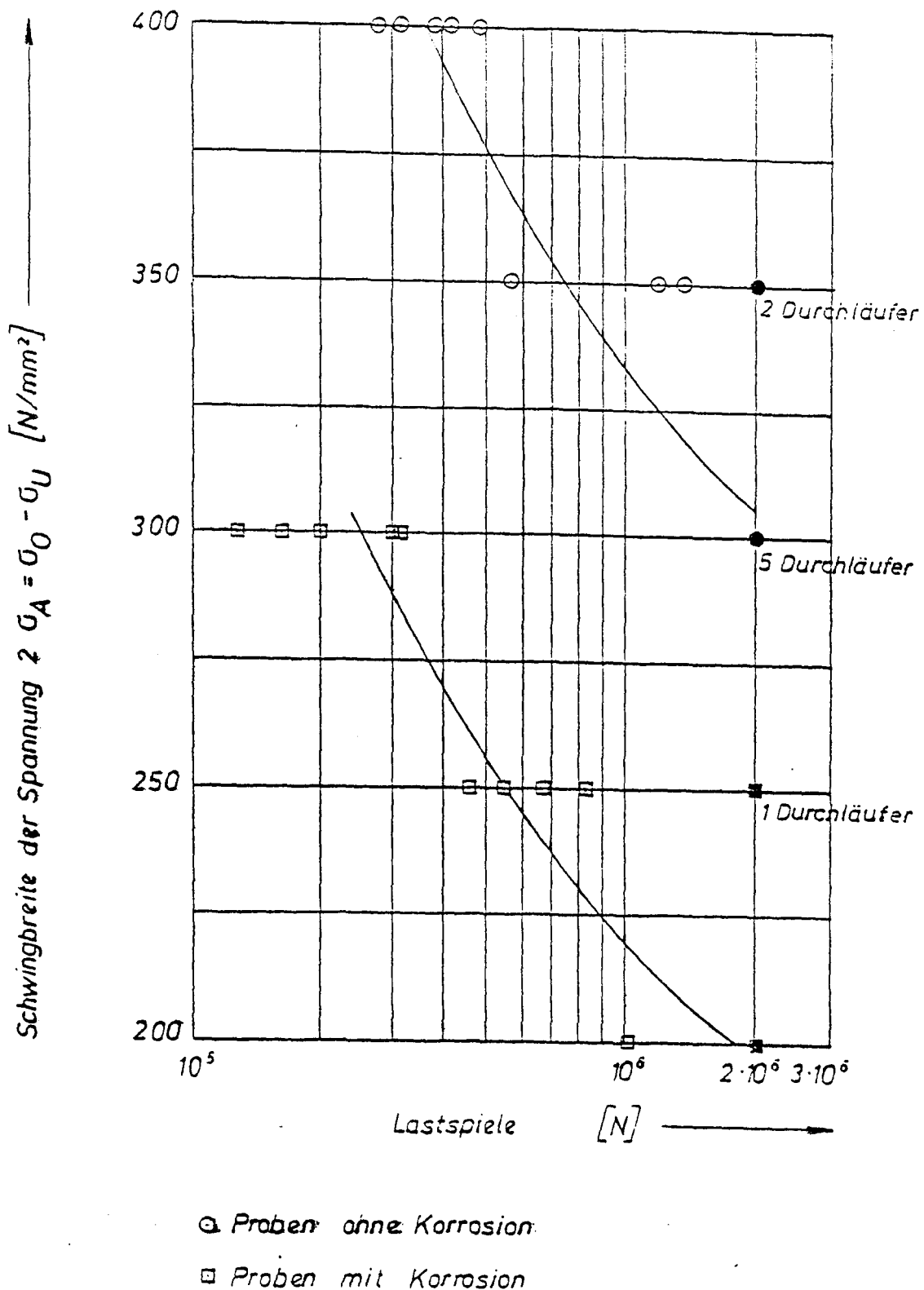


Abb. 65 Ergebnis von Dauerschwingversuchen an korrosionsfreien (ganz vereinzelte Narben mit Tiefen zwischen 20µ und 60µ) Proben und angerosteten Proben mit dicht beieinanderliegenden Narben mit Tiefen zwischen 20µ und 120µ

Von den insgesamt acht Dauerbrüchen der korrosionsfreien Drahtproben war an zwei Bruchflächen keine eindeutige Zuordnung zwischen einer Narbe und dem Bruchausgang erkennbar. Alle übrigen Bruchausgänge wiesen Narben mit Tiefen zwischen 30μ und 60μ auf. Hier fiel auf, daß diese Narben erst durch die Dauerschwingversuche gefunden wurden, da sie - auch bei einer sorgfältigen Inspektion - durch Augenschein nicht zu sehen waren. Die Herkunft dieser vereinzelt, kleinen Rostnarben erklärt sich u.U. aus Kontaktkorrosionsstellen zwischen Spannstahl und Hüllrohr bzw. Drahtspirale oder auch aus Korrosion in den Zwickeln zwischen zwei Stählen, wobei durchaus denkbar ist, daß diese Narben schon vor dem Verpressen entstanden sind.

Einen Eindruck von der Dauerbruchfläche einer angerosteten Probe mit einer ca. 100μ tiefen Rostnarbe am Bruchausgang vermitteln die Abbildungen 66 und 67.

Restvorspannungsmessungen waren an diesem Bauwerk nicht möglich.

4.4.3.5 Zusammenfassende Wertung zum Langzeitverhalten der Spanndrähte aus der Brücke über den Verschiebebahnhof Oldenburg/Ostenburg

Aus dem vorstehend beschriebenen Brückenbauwerk konnten Spannstahlproben aus einem vollständig verpreßten und einem unvollständig verpreßten Spannglied entnommen werden. Der eingebaute Spannstahl St 145/165 (St 1420/1620) rund, glatt, $\varnothing 5,2$ mm, warmgewalzt und vergütet, wies nach 25-jähriger Nutzungsdauer folgende Zustände und Eigenschaften auf:

Bei Spanndrähten aus einem einwandfrei verpreßten Hüllrohr, dessen Mörtel Cl-Gehalte unter 0,01 Masse-% aufwies, waren augenscheinlich keine Veränderungen feststellbar. Erst Dauerschwingversuche und eine mikroskopische Untersuchung der Oberflächen zeigte, daß vereinzelt kleine Narben mit Tiefen zwischen 20μ und 60μ vorhanden waren. Diese Narben hatten weder auf die Festigkeitseigenschaften noch auf die Bruchdehnung einen meßbaren Einfluß. Ob, und in welchem Maße, die Dauerschwingfestigkeit durch diese Narben abgemindert wurde, läßt sich nicht beurteilen, da Vergleichswerte aus der Herstellungszeit fehlen. Bei den Versuchen fiel auf, daß zwischen den Proben

"mit" bzw. "ohne" Narben am Ausgang des Dauerbruchs - bei gleichen Prüfparametern - kein signifikanter Unterschied in den ertragenen Lastwechseln festgestellt werden konnte. Die u.U. vorhandene Abnahme der Dauerfestigkeit wird daher allenfalls in der Größenordnung 10 % liegen.

Angerostete Proben aus unvollständig verpreßten Hüllrohren (kein Feuchtezutritt, Cl-Gehalt des Verpreßmörtels unter 0,01 Masse-%) waren auf ihren Oberflächen mit dicht beieinanderliegenden Narben mit Tiefen zwischen 20µ und 120µ bedeckt. Diese Narben hatten keinen Einfluß auf die Festigkeitseigenschaften der Spanndrähte, jedoch hatten hier Bruchdehnung als auch Dauerschwingfestigkeit jeweils Einbußen von etwa 30 % erlitten. Die mittlere Narbentiefe an den Bruchausgängen der Dauerbrüche lag bei 100µ).

Abb. 66

Dauerbruchfläche mit
Narbe am Bruchausgang.
V ~ 10-fach

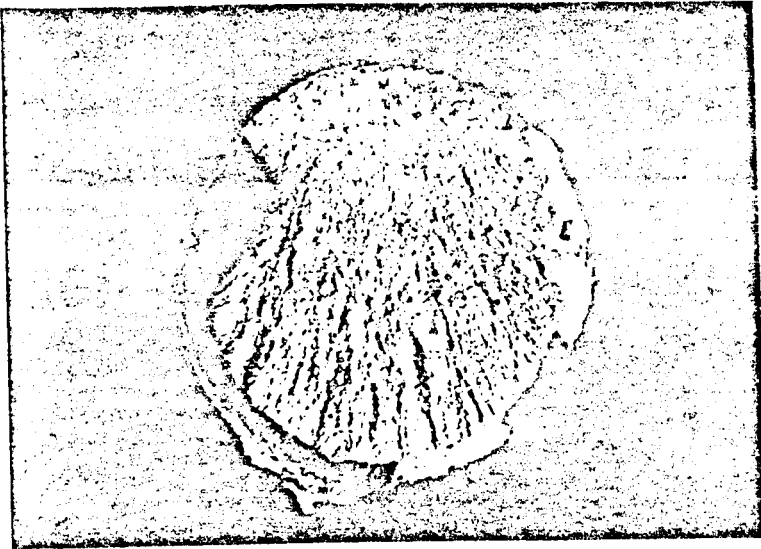
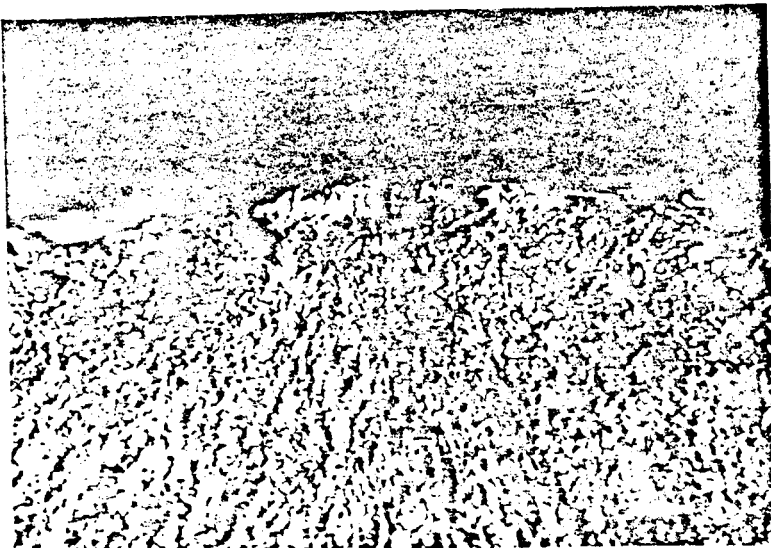


Abb. 67

Narbe (~ 100µ tief)
am Bruchausgang der
Probe von Abb. 106.
V ~ 80-fach



4.5 BAB-Brücke über den Rhein bei Köln-Rodenkirchen

4.5.1 Angaben zum Bauwerk

Die Rodenkirchener Autobahnbrücke ist eine Hängebrücke, die eine 570 m lange, längs- und quer vorgespannte, fugenlose Fahrbahnplatte besitzt. Die Fahrbahnplatte ist eine Stahl-Beton-Verbundkonstruktion, in die im Jahre 1955 warmgewalzte Spannstähle St 80/105 (St 780/1030), rund, glatt, \varnothing 26 mm als Spannbewehrung eingebaut worden waren. Die Fahrbahnplatte wurde dann seit ihrer Fertigstellung direkt befahren, so daß die Betonoberfläche nach dem Auftreten erster Schäden in den Jahren 1966 bis zum Auftragen einer Verschleißdecke 1971 insgesamt 16 Jahre mechanischem Verschleiß sowie dem unmittelbaren Witterungseinfluß und eindringender Tausalzlösung ausgesetzt war. Die Schäden setzten sich jedoch in der Folgezeit in Form großflächiger Abplatzungen von Beton und Verschleißdecke fort (vgl. z.B. Abb. 68 und 69), so daß in den Jahren 1977/78 umfangreiche Untersuchungs- und Sanierungsarbeiten für eine weitere, befristete Nutzung des Bauwerkes in Angriff genommen und abgeschlossen wurden.

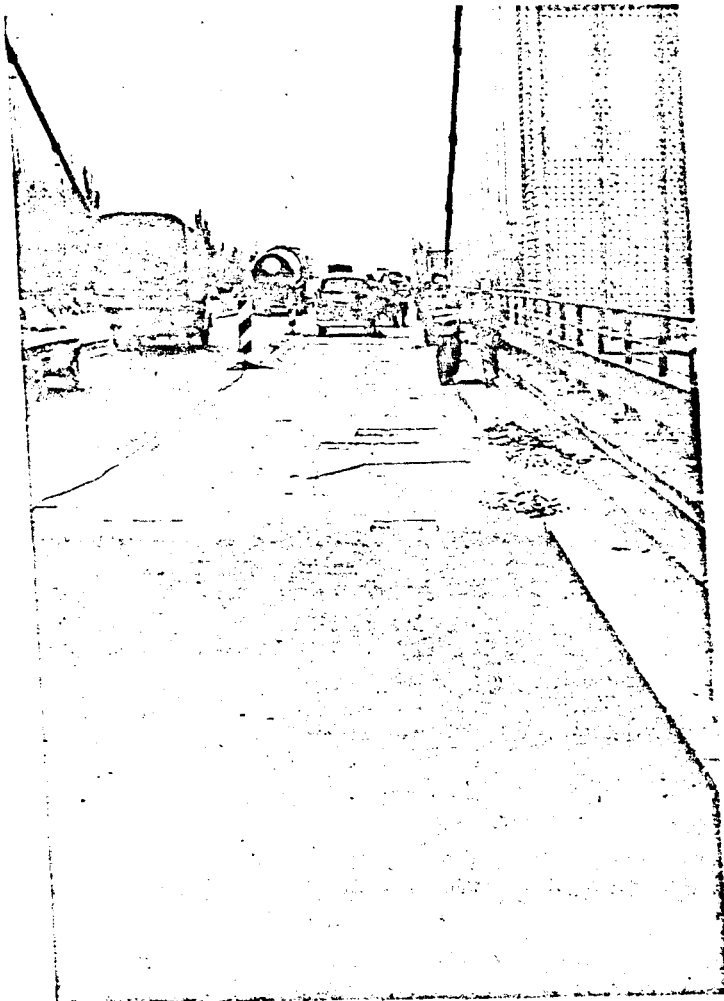


Abb. 68

Freigelegte Abplatzschäden und deren Häufigkeit auf der Fahrbahnplatte der Autobahnbrücke Köln-Rodenkirchen

4.5.2 Beton der Fahrbahnplatte

Eine große Zahl entnommener Bohrkerne \varnothing 150 mm ermöglichte eine recht genaue Bestimmung von Betondruck- und -spaltzugfestigkeiten. Es ergaben sich Mittelwerte von 66 N/mm^2 (51 N/mm^2 - 85 N/mm^2) für die Druckfestigkeit und $3,7 \text{ N/mm}^2$ ($2,9 \text{ N/mm}^2$ - $4,8 \text{ N/mm}^2$) für die Spaltzugfestigkeit. Es wurde außerdem festgestellt, daß sich die Festigkeitswerte zufällig über die Fahrbahnplatte verteilen, also keine Bereiche ausgesprochen guter bzw. schlechter Festigkeit vorliegen.

Betonzerstörungen bzw. -zermürbungen beschränkten sich auf die Oberfläche der Fahrbahnplatte und hatten Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung mit Cl-Einwirkung (Zermürbung) bzw. Rostabsprengungen durch eingedrungene Feuchte mit Cl-Einwirkung als Ursache.

Eine sehr umfangreiche Cl-Analyse, die sich über die gesamte Fahrbahnplatte erstreckte, zeigte, daß Chloride bis zu 10 cm tief in den Beton eingedrungen waren (vgl. Abb. 70). Die für eine Korrosion kritischen Grenzkonzentrationen von 0,4 Masse-% bzw. 0,2 Masse-% des Zementanteils wurden erst in etwa 4 - 7 cm Tiefe unterschritten.

4.5.3 Spannglieder und Spannstahl

Eingebaut waren für Längs- und Quervorspannung warmgewalzte, naturharte Spannstäbe St 80/105 (St 780/1030), rund, glatt, \varnothing 26 mm. Die Stäbe steckten in glatten Blechhüllrohren mit einer lichten Weite von 30 mm. Die Möglichkeit eines Ausbaus von Spannstäben bestand nicht, so daß sich die Beurteilung des Stahls allein auf den Augenschein an Abplatzungen des Fahrbahnbetons über Spanngliedern beschränken mußte.

4.5.3.1 Zustand der Hüllrohre

Die Hüllrohre bestanden aus glatten, längs gefalzten Blechrohren mit einem Innen- \varnothing von 30 mm. In der Regel waren sie im Bereich der Betonausplatzungen über Spanngliedern auf der Spannglied-oberseite bereits durch Feuchte- und Cl-Einfluß völlig

weggerostet (vgl. Abb. 69 und 71). Hüllrohre, die aufgebogen werden konnten und innenseitig noch mit Verpreßmörtel bedeckt waren, zeigten eine fast noch blanke Oberfläche (vgl. Abb. 72). Zu Kontrollzwecken wurde ein Spannglied in einem äußerlich schadensfreien Fahrbahnplattenabschnitt freigelegt. Hier war das Hüllrohr innen wie außen korrosionsfrei (vgl. Abb. 73).

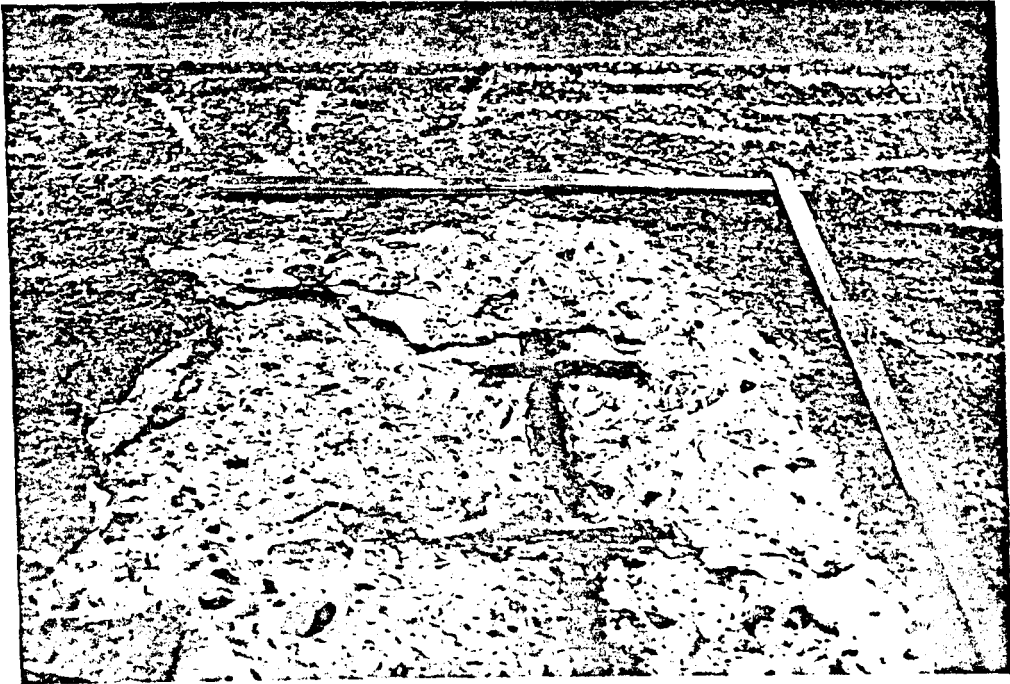


Abb. 69 Betonausplatzung in der Fahrbahndecke mit einem korrodierten Spannglied im Zentrum der Ausplatzung

4.5.3.2 Verpreßmörtel und Zustand der Verpressung

An allen Öffnungsstellen war eindeutig zu erkennen, daß die Spannglieder verpreßt waren. Die im umgebenden Beton z.T. vorhandenen hohen Cl-Gehalte in Verbindung mit Feuchtwechsels hatten jedoch zur oberseitigen, völligen Zerstörung der Hüllrohre geführt. Die vorhandene, aber vergleichsweise sehr dünne Verpreßmörtelschicht von i.M. nur 2 mm Dicke konnte dann ebenfalls keinen langfristigen Schutz mehr darstellen. Sie zerfiel im Zuge der umgebenden Betonzermürbung bzw. -abplatzung.

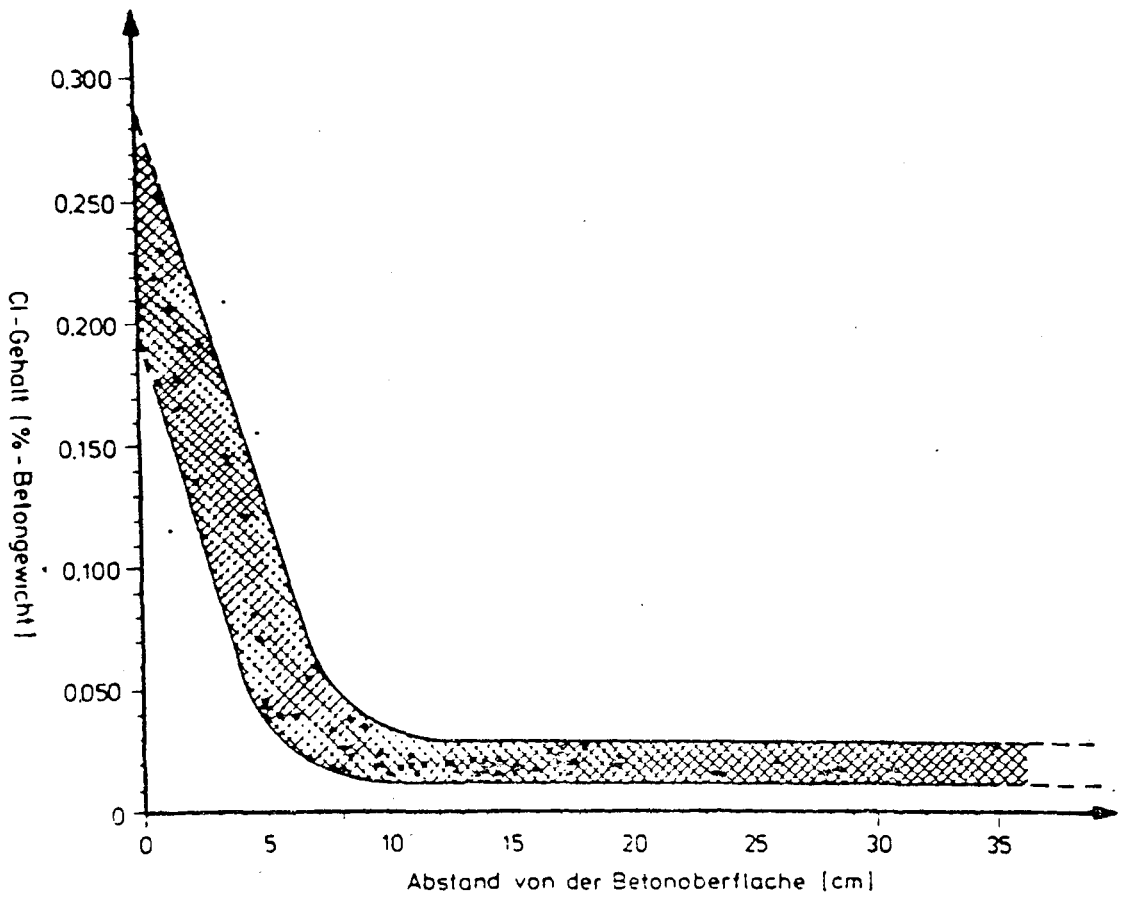


Abb. 70 Cl-Verteilung in der Fahrbahnplatte der Autobahnbrücke Köln-Rodenkirchen

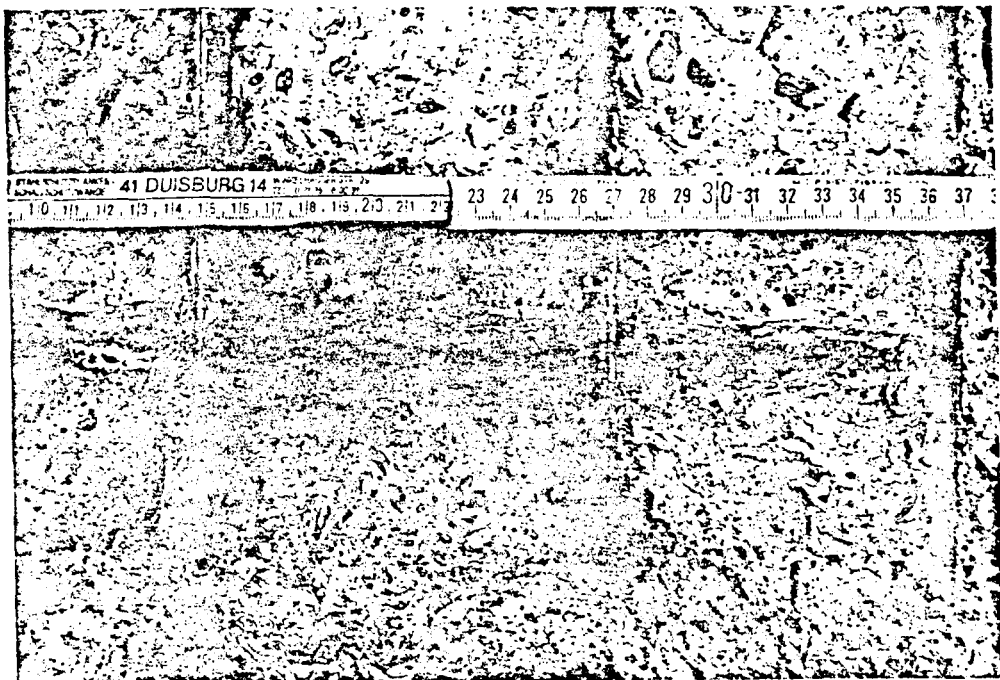


Abb. 71 An einer Betonabplatzung freiliegendes Querspannglied, dessen Hüllrohr oberseitig bereits völlig weggerostet ist

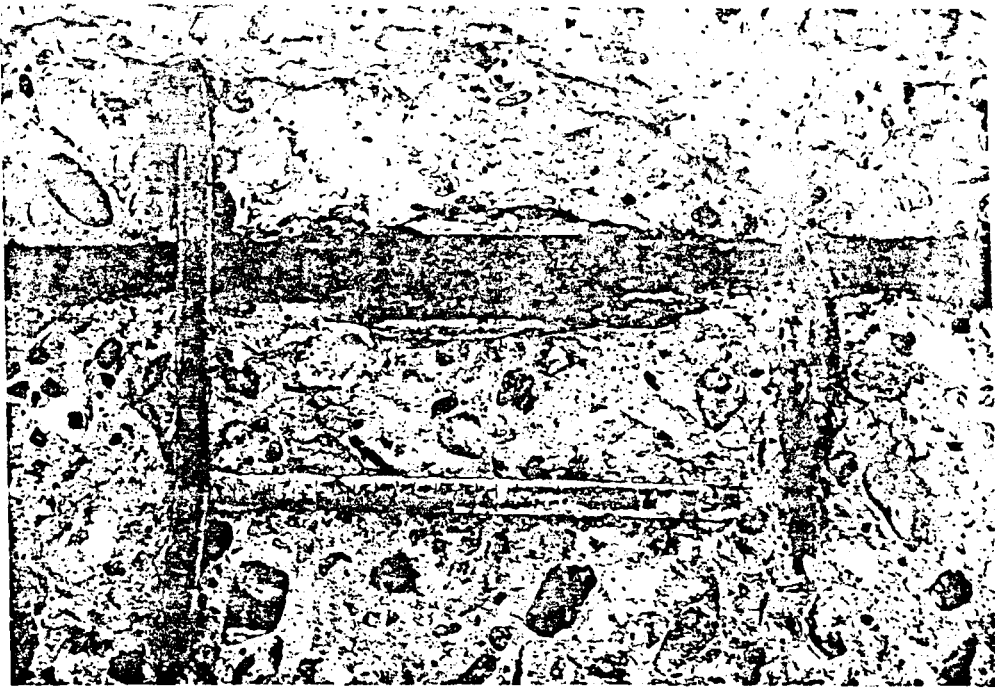


Abb. 72 An einer Betonabplatzung freiliegendes Querspannglied, dessen Hüllrohr oberseitig bereits völlig weggerostet ist. Die in Bildmitte aufgebogenen Hüllrohrreste zeigen innen nach Entfernung des Verpreßmörtels noch eine metallblanken Oberfläche

4.5.3.3 Ordnung im Hüllrohr

Durch die sehr eingeengte Beurteilungsmöglichkeit (keine Spanngliedentnahme) sind hier keine Aussagen möglich.

4.5.3.4 Zustand des Spannstahls

Der Zustand der Spannstähle konnte ausschließlich durch Augenschein an Betonabplatzungen der Fahrbahnoberseite mit freiliegenden Spanngliedern (vgl. Abb. 69 u. 71-72) sowie an einigen Spanngliedern beurteilt werden, die in einwandfreien Betonbereichen an Fahrbahnober- und -unterseite durch Stemmen freigelegt worden waren (vgl. Abb. 73). Eine Spannstabentnahme war nicht möglich.

Spannstäbe in ungeschädigten Spanngliedern mit einwandfreier Verpressung waren augenscheinlich frei von jeglicher Korrosion. Auf der Fahrbahnplattenoberseite freiliegende und korrodierte Spannstäbe im Bereich von Betonabplatzungen wiesen deutliche Korrosionsnarben mit Tiefen bis maximal 2 mm auf. Auffällig war jedoch, daß in keiner der zahlreichen Öffnungsstellen ein Bruch

gefunden wurde. Selbst ein Spannstababschnitt, der als solcher nicht erkannt, lange Zeit kaum geschützt in einem Schlagloch über längere Zeit direktem Einfluß von Feuchte und Tausalz ausgesetzt war, zeigte keinen Bruch.

4.5.3.5 Zusammenfassende Wertung zum Langzeitverhalten des Spannstahls in der Fahrbahnplatte der Autobahnbrücke Köln-Rodenkirchen

Da am vorliegenden Bauwerk keine Proben entnommen werden konnten, sondern die Beurteilung nur durch Augenschein an Öffnungs- bzw. Schadstellen möglich war, sind hier nur sehr begrenzte Aussagen möglich, die sich folgendermaßen zusammenfassen lassen:

Spannstähle der Güte St 80/105 (St 780/1030), rund, glatt, \varnothing 26 mm, warmgewalzt, naturhart, zeigten durch Augenschein nach 22-jähriger Nutzungsdauer keinerlei Korrosion, sofern sie in unzerstörten, völlig ausgepreßten Hüllrohren lagen.

Spannstähle, die in durchgerosteten Hüllrohren (infolge Feuchte- und Cl-Einwirkung) längere Zeit (ca. 4-7 Jahre) relativ ungeschützt den gleichen Einflüssen ausgesetzt waren, wiesen auf ihren Oberflächen deutliche Narbenkorrosion mit Narbentiefen bis zu 2 mm auf. Diese Narben hatten in der Regel die Form von Mulden, d.h. ihr Durchmesser war größer als ihre Tiefe. Brüche konnten jedoch - trotz Feuchte- und Cl-Einwirkung - in keinem Fall gefunden werden.

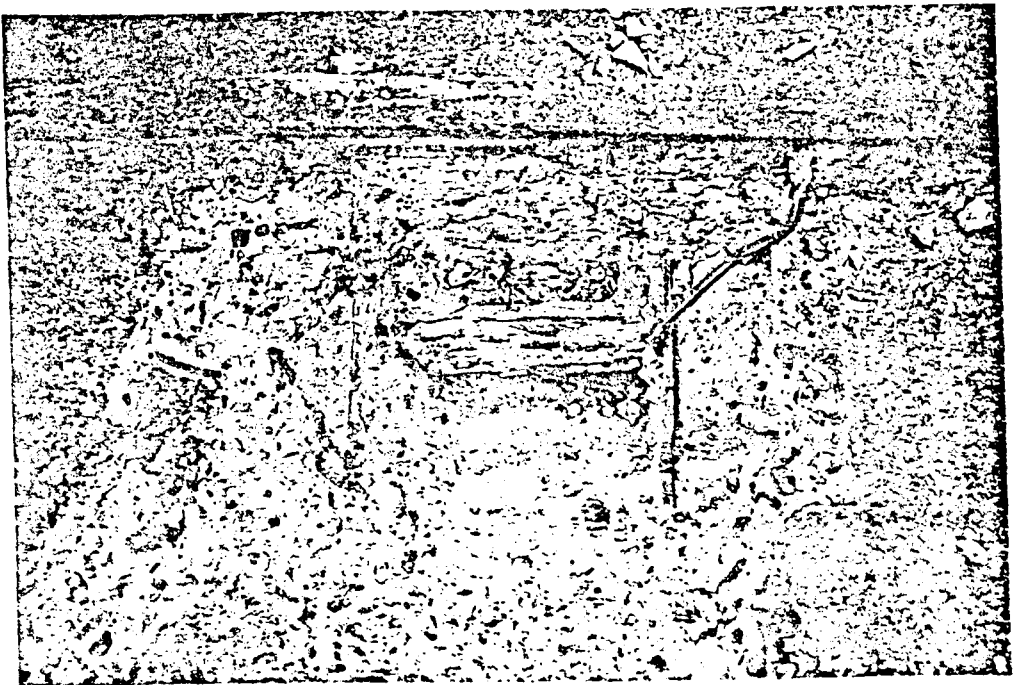


Abb. 73 Freigelegtes Spannglied in einem Fahrbahnabschnitt ohne Betonabplatzung. Spannstahl

4.6 Brückenbauwerk Bergheimer-Straße, Überführung B447/BAB-A57 bei Neuß

4.6.1 Angaben zum Bauwerk

Der Brückenüberbau wurde 1957 als längsvorgespannter einfeldriger Hohlkasten mit einer Spannweite von 28 m und einer Gesamtbreite von 15,10 m erstellt. Die Vorspannung erfolgte nach dem System Freyssinet mit 50 Mp Spannbündeln, die jeweils aus 12 warmgewalzten, vergüteten Sigma-Stählen St 135/150 (St 1320/1470) rund, glatt, \varnothing 8 mm bestanden. In Querrichtung wirkte die Fahrbahnplatte als schlauffbewehrte, durchlaufende Platte. Die Spannglieder waren in den 6 Stegen - von denen je zwei durch Bodenplatten zu Hohlkästen zusammengefaßt sind - und teilweise auch in den Bodenplatten der Hohlkästen untergebracht. Einen Eindruck vom Brückenbauwerk und vom Querschnitt des Überbaus vermittelt Abbildung 74.

Im Zuge des Ausbaus der BAB-A57 wurde das Bauwerk 1978 durch eine Sprengung abgebrochen und durch einen Neubau mit größerer Spannweite ersetzt. Innerhalb der 20-jährigen Nutzungsdauer sind Schäden an dem Spannbetonüberbau nicht bekannt geworden.

4.6.2 Beton des Überbaus

Laut Brückenbuch wurden für den Überbau 350 kg/m^3 PZ 225 verwendet. Die angestrebte Betongüte von B30 wurde weit überschritten, denn bereits die Prüfung der 28-Tage-Würfel ergab Festigkeiten um 45 N/mm^2 . Festigkeiten zum Abbruchzeitpunkt konnten nicht bestimmt werden, da die Möglichkeit der Entnahme bzw. Sicherstellung dafür geeigneter Probekörper nicht bestand. Die Karbonatisierungstiefe an den Hohlkastenunterseiten wurde an eingesammelten Bruchstücken zu etwa 3 mm bestimmt. Die Cl-Gehalte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt:

Ort	Cl-Gehalt in Masse-% des Zements
Fahrbahnplatten-Oberseite	0,1
Hohlkastenboden-Unterseite	0,2
Zwischen zwei Spanngliedern des Hohlkastenbodens	0,06

Es zeigt sich eine 2- bis 3-fache Erhöhung des Cl-Gehaltes an der Fahrbahnplattenunterseite durch aufgewirbelte Tausalzlösung. Die Konzentrationserhöhung auf 0,2 Masse-% bezüglich des Zementanteils ist jedoch unerheblich. Im Bereich der wenigstens 3 cm überdeckten Spannglieder betrug der Cl-Gehalt dann weniger als 0,1 Masse-%, was der Ausgangskonzentration zur Bauzeit entsprach.

4.6.3 Spannglieder und Spannstahl

Die in die Bodenplatten und Stege der Hohlkästen eingebauten 50 Mp-Spannglieder des Systems Freyssinet bestanden jeweils aus 12 warmgewalzten und vergüteten Sigma-Spannstählen der Güte St 135/150 (St 1320/1470), rund, glatt, \varnothing 8 mm, die um eine Drahtspirale herum angeordnet waren (vgl. Abb. 79).

Da das Brückenbauwerk durch eine Sprengung abgebrochen wurde, gestaltete sich die Suche nach augenscheinlich unbeschädigten Spanngliedabschnitten sehr schwierig (vgl. Abb. 75). Insgesamt konnten unter Mithilfe des Abbruchunternehmens zwei ca. 1,8 m lange, äußerlich unbeschädigte Spanngliedabschnitte sowie ein ca. 2,3 m langes und 50 cm breites Stück einer Hohlkastenbodenplatte sichergestellt werden, das zwei Spannglieder enthielt.

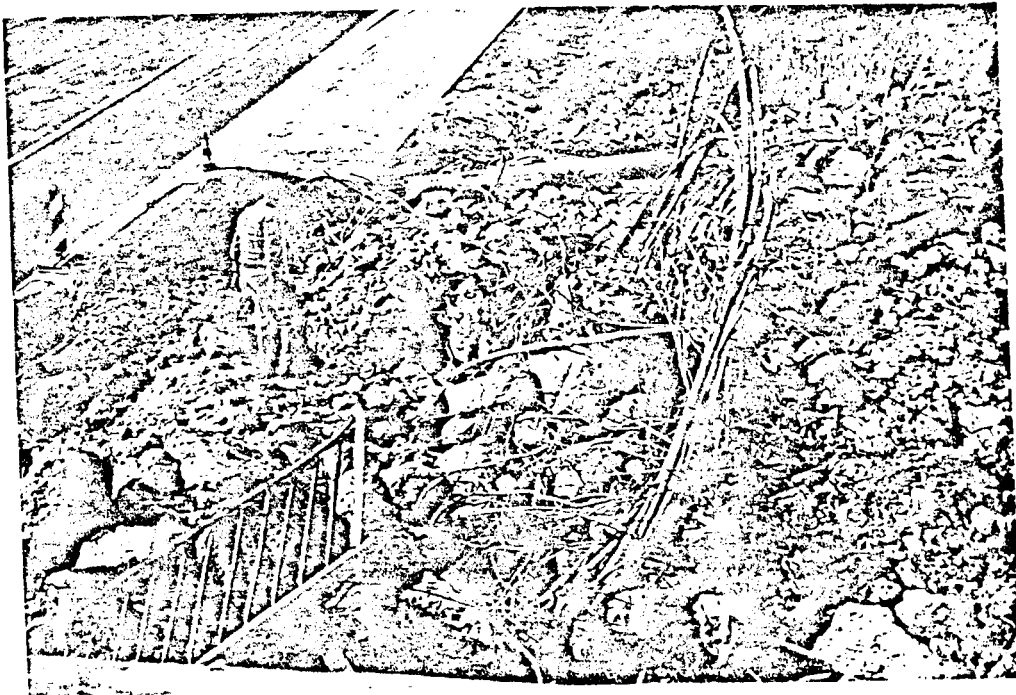


Abb. 75 Aufsuchen geeigneter Probekörper aus den Sprengungsstrümmern

4.6.3.1 Zustand der Hüllrohre

Die Hüllrohre waren spiralförmig aus einem Blechstreifen gewickelt. Der spiralförmig umlaufende Falz sorgte zusammen mit einer Sicke in der Blechstreifenmitte für guten Verbund zwischen Spannglied und Beton (vgl. Abb. 76 u. 77). Der Hüllrohrinnen-durchmesser betrug 45 mm.

Die sichergestellten Hüllrohre waren innen und außen metallisch blank (vgl. Abb. 76 u. 77) und wiesen auch in den Falzen keine Korrosionsschäden auf.

4.6.3.2 Verpreßmörtel und Zustand der Verpressung

Bei dem Verpreßmörtel handelte es sich um einen üblichen Mörtel aus PZ und Wasser. Ob seinerzeit noch ein Quellmittel zugefügt worden war, ist nicht bekannt. Der Cl-Gehalt des Verpreßmörtels lag mit 0,008 Masse-% weit unterhalb der zulässigen Konzentration. Einen Eindruck von der Mörtelstruktur vermittelt Abb. 78.

Wie die Abbildungen 79 - 81 zeigen, war es häufig nicht gelungen, den von Spirale und Spanndrähten gebildeten Kernhohlraum der Spannglieder vollständig zu verpressen. Jeweils im oberen Bereich bildeten sich blasig-poröse oder längere Verpreßmängel. Dieser Verpreßmangel wurde auch schon an anderen Bauwerken beobachtet (vgl. z.B. Kap. 4.1) und scheint für das Verfahren gelegentlich typisch zu sein. Er führt in der Regel dazu, daß rund 1/3 der Spanndrähte in den betroffenen Querschnitten keine vollständige Mörtelumhüllung und damit auch keinen vollständigen Korrosionsschutz besitzen.

4.6.3.3 Ordnung im Hüllrohr

Fehler in der Spanndrahtanordnung im Hüllrohr um die Spirale herum wurden am vorliegenden Bauwerk nicht beobachtet. Die Anordnung der Spanndrähte entsprach dem in Abb. 79 wiedergegebenen Zustand.

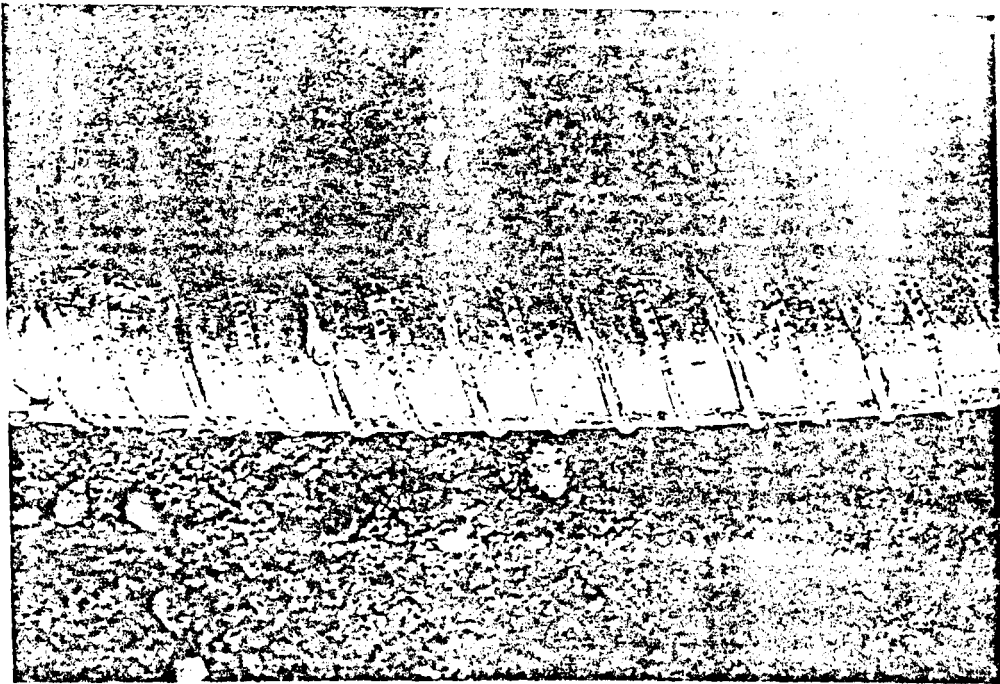


Abb. 76 Zustand der sichergestellten Spannglied-
abschnitte

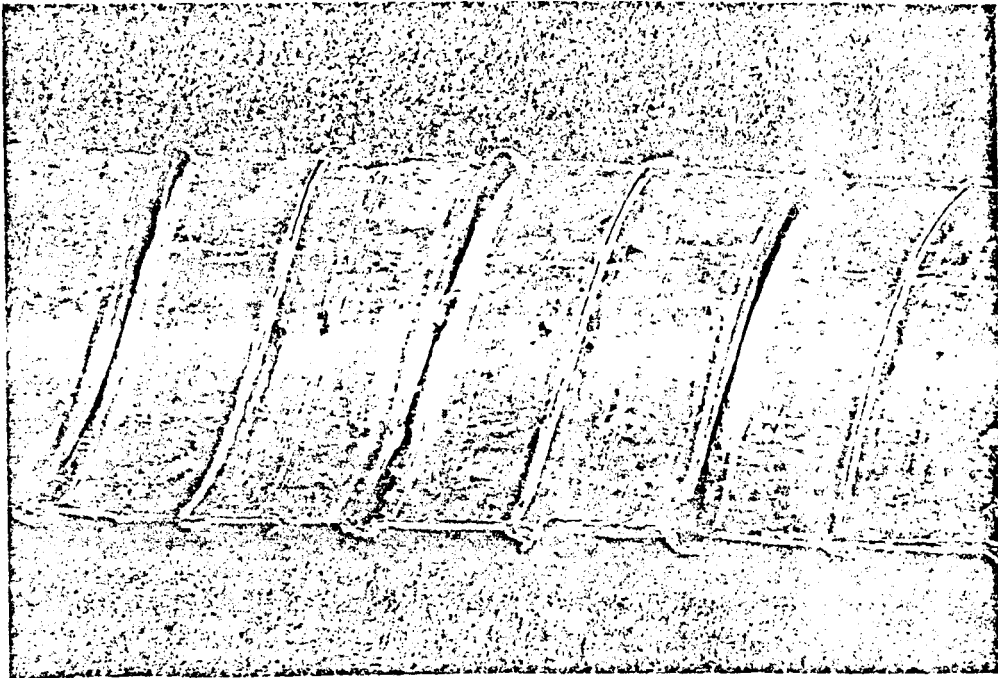


Abb. 77 Zustand der Hüllrohre nach dem Entfernen
des Verpreßmörtels (Originalgröße)

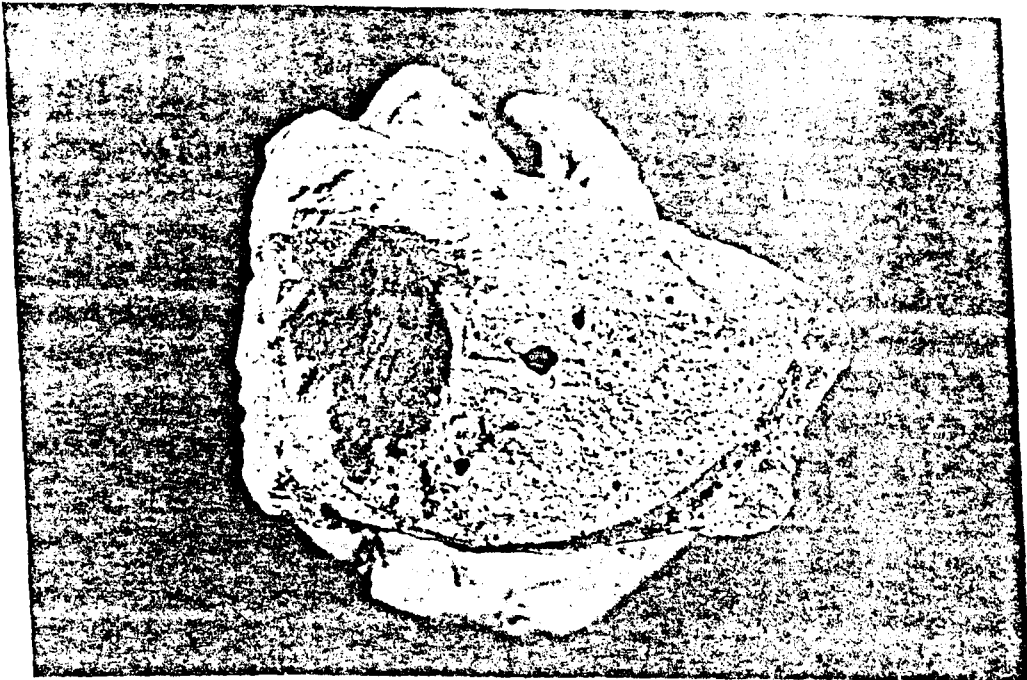


Abb. 78 Verpreßmörtelstruktur bei ca. 3,5-facher Vergrößerung

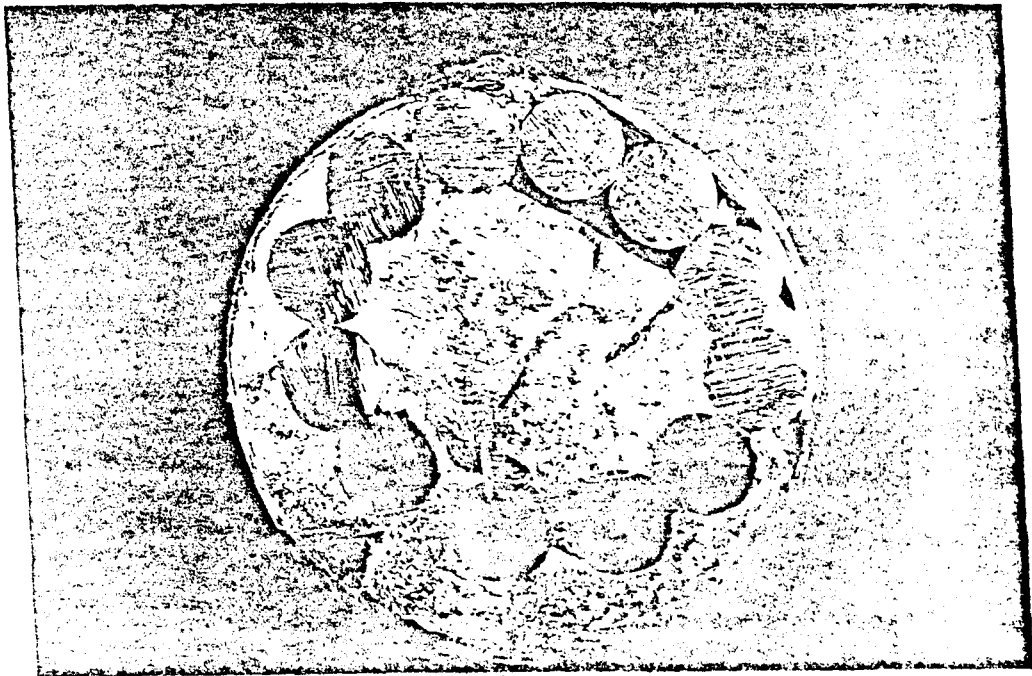


Abb. 79 Anordnung der Spanndrähte im Hüllrohr mit fehlendem Verpreßmörtel im oberen Teil des Mörtelkerns. $V \sim 1,7$ -fach

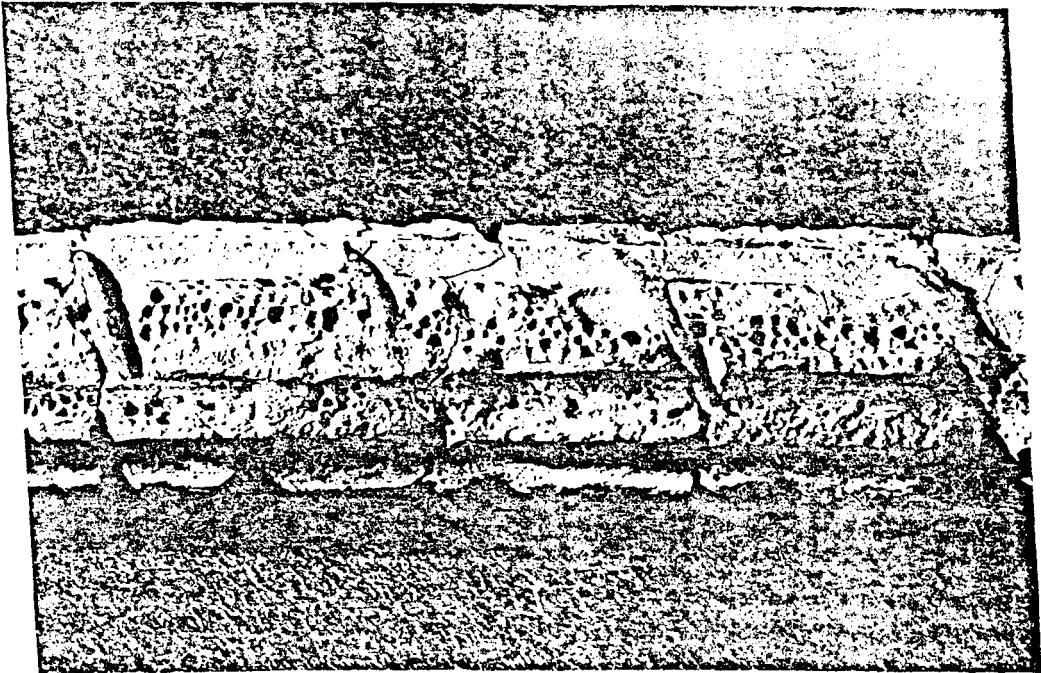


Abb. 80 Verpreßmangel infolge schaumiger Struktur des Verpreßmörtels im oberen Teil des Mörtelkerns (vgl. Abb. 79).
V ~ 1,5-fach

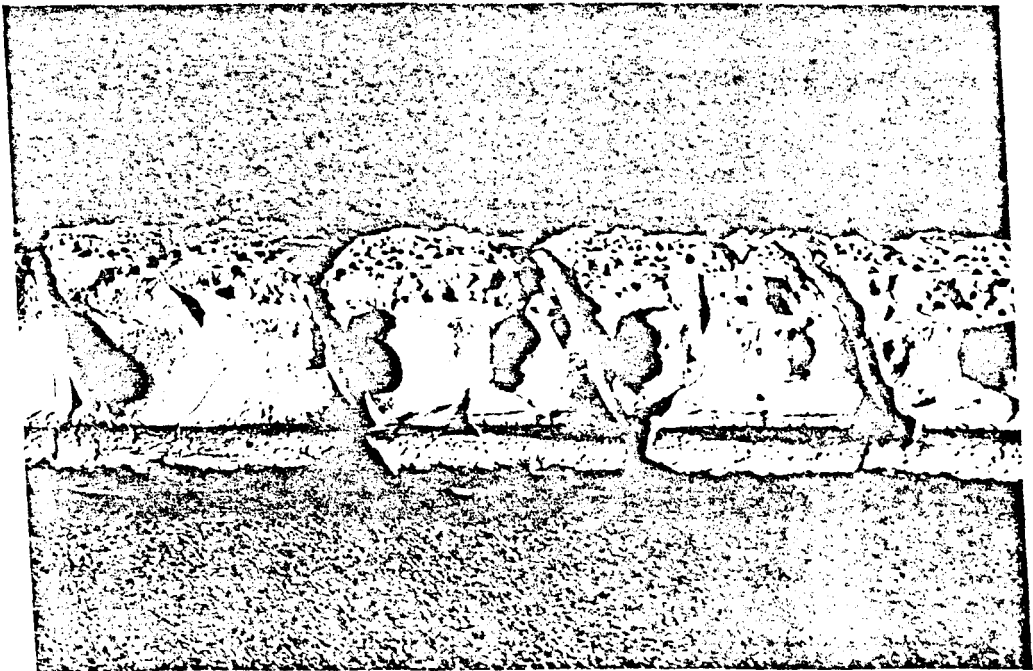


Abb. 81 Schaumige Verpreßmörtelstruktur und größere, blasige Hohlräume im oberen Teil des Verpreßmörtelkerns (vgl. Abb. 79).
V ~ 1,5-fach

4.6.3.4 Zustand des Spannstahls

Der hier verwendete, warmgewalzte und vergütete Sigma-Spannstahl St 135/150 (St 1320/1470) rund, glatt, \varnothing 8 mm, ließ sich nach dem Ausbau aus den Spanngliedern durch Augenschein grob in drei Klassen einteilen:

- Spanndrähte ohne erkennbare Oberflächenkorrosion aus Bereichen vollständiger Verpreßmörtelumhüllung,
- Spanndrähte mit leichten Oberflächenkorrosionsstreifen und ganz vereinzelt Narben mit Tiefen bis zu 100 μ aus den unvollständig verpreßten Abschnitten des Mörtelkerns,
- Spanndrähte mit Oberflächenkorrosion in Form dicht beieinanderliegender Narben mit Tiefen bis zu 450 μ , ebenfalls aus den vorstehend genannten Bereichen.

Einen Eindruck vom Oberflächenzustand der entnommenen Spanndrähte und den Auswirkungen der unvollständigen Verpressung im Verpreßmörtelkern geben die Abbildungen 82 - 89. Die dargestellten Oberflächenzustände haben ihre Ursache allein in dem beschriebenen Verpreßfehler und der durch den Verpreßmörtel bereitgestellten Feuchtigkeit. Nachträglich sind weder korrosionsfördernde Salze noch Feuchtigkeit in die Hüllrohre eingedrungen.

Wie die nachfolgende Tabelle zeigt, war ein Einfluß der vorstehend klassifizierten drei Oberflächenzustände der Spanndrähte in statischen Zugversuchen weder bei den Festigkeiten noch bei der Bruchdehnung A_{10} feststellbar. Die Werte sind jeweils Mittelwerte aus fünf Einzelbestimmungen.

Korrosionszustand	$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A_{10} %
korrosionsfrei	1385	1514	8,6
leichte Korrosion, vereinzelt Narben bis 100 μ tief	1394	1517	8,9
Linienkorrosion mit vielen Narben bis 450 μ tief	1390	1513	8,9

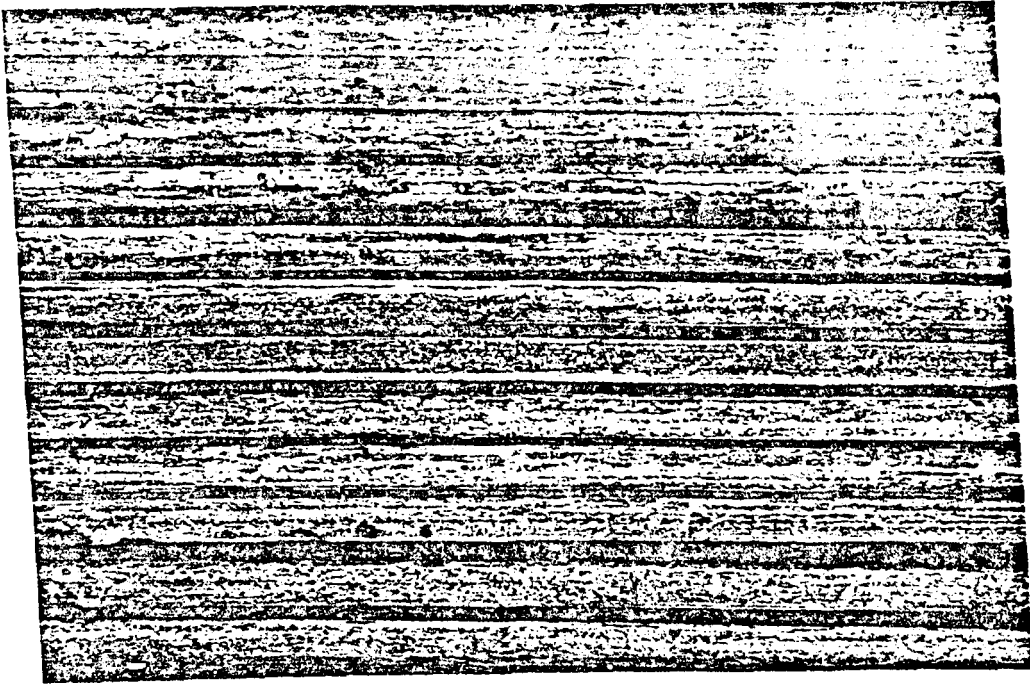


Abb. 82 Alle 12 Spanndrähte eines Spanngliedes mit Korrosion im Verpreßmangelbereich des Mörtelkerns (vgl. Abb. 79-81)

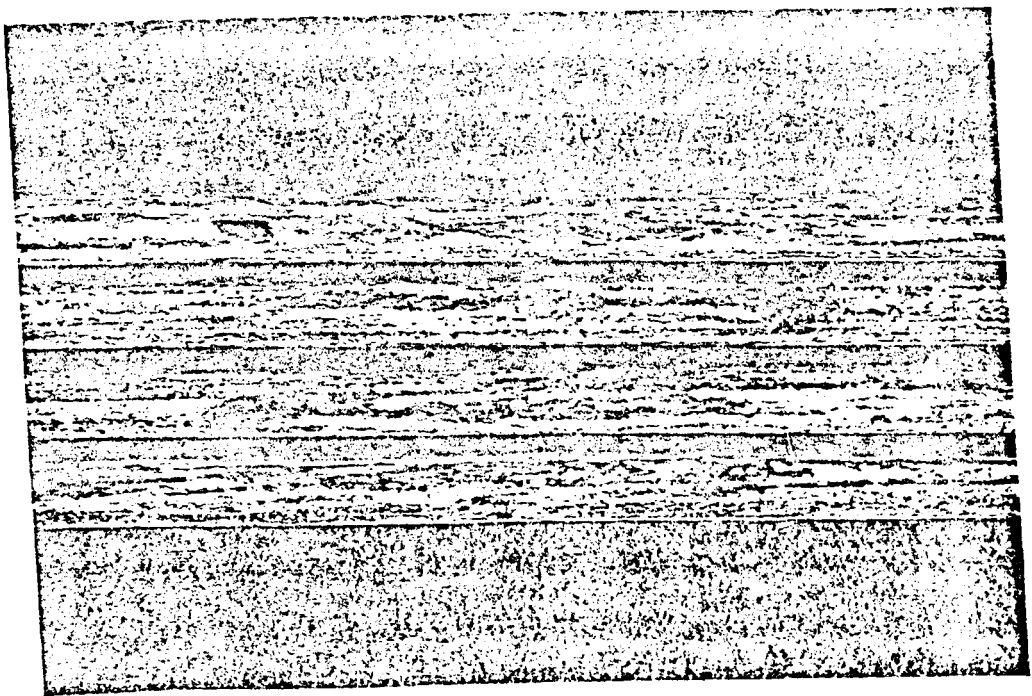


Abb. 83 Korrodierte Stähle der Abb. 82 in Originalgröße mit Korrosionslinien durch Linienkontakt benachbarter Drähte

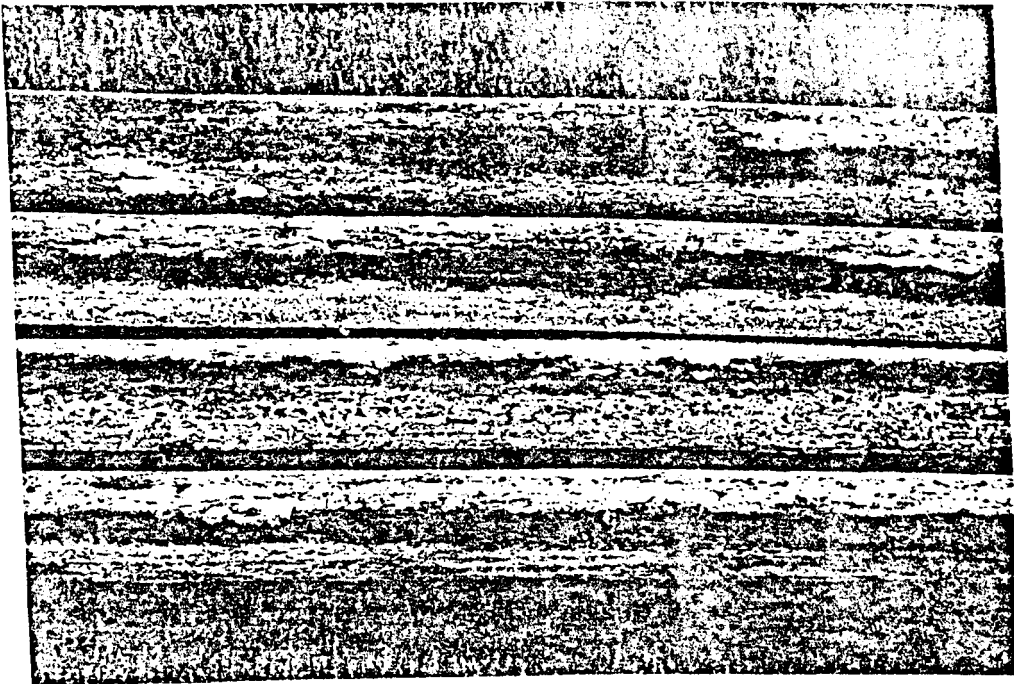


Abb. 84 Linienkorrosion an Spanndrähten aus unvollständig verpreßten Hüllrohrbereichen

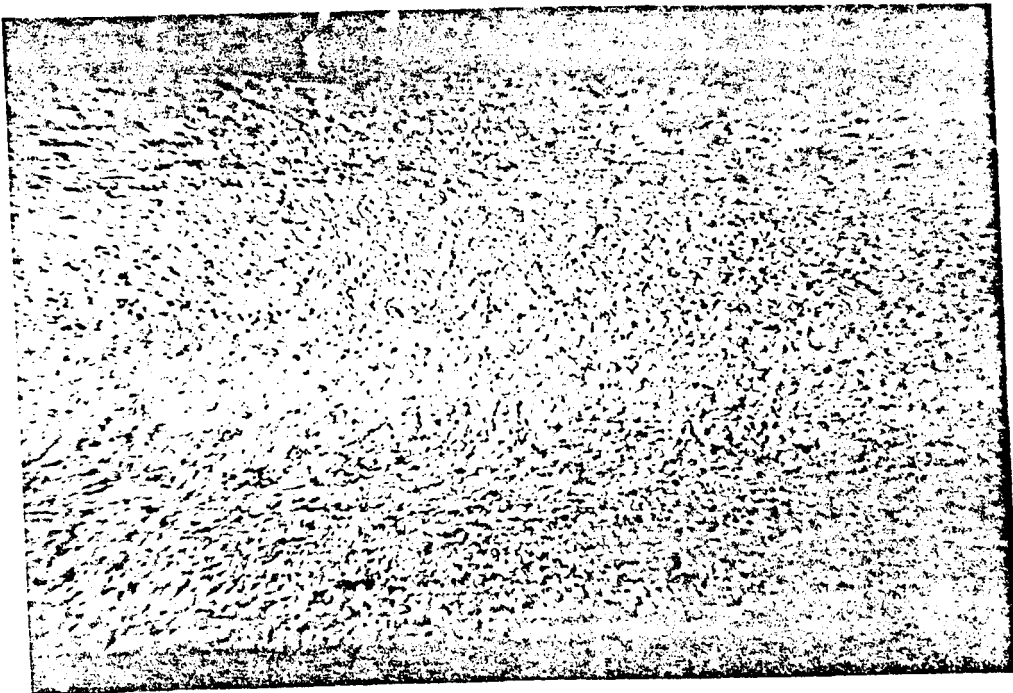


Abb. 35 Oberflächenzustand eines Spanndrahtes aus einem vollständig verpreßten Hüllrohrbereich. $V \sim 10$ -fach

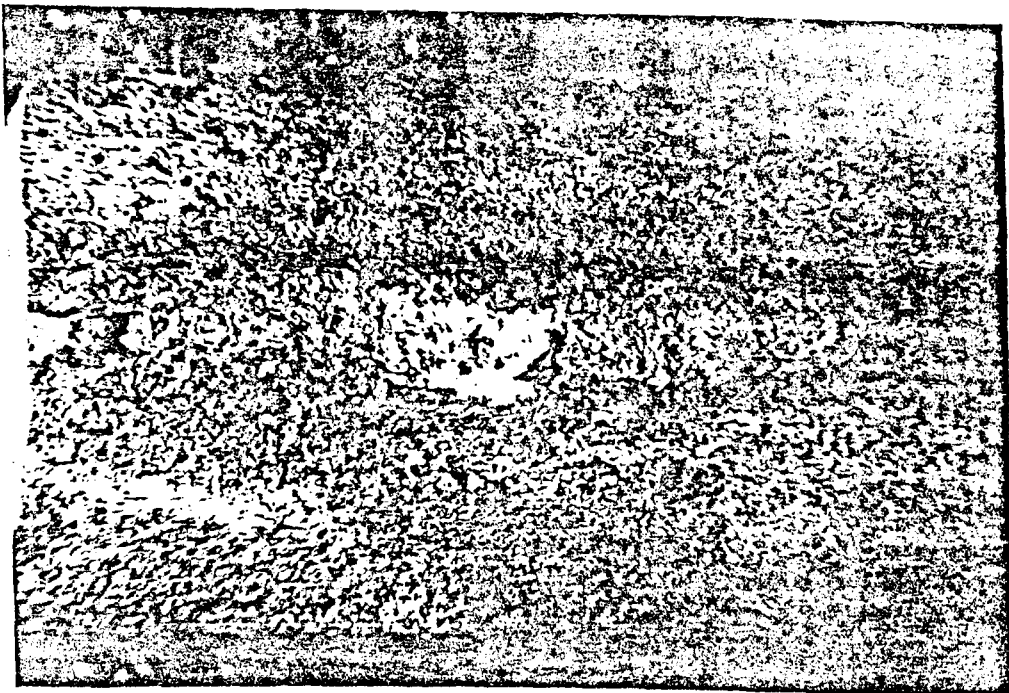


Abb. 86 Spanndraht mit Linienkorrosion.
V ~ 10-fach

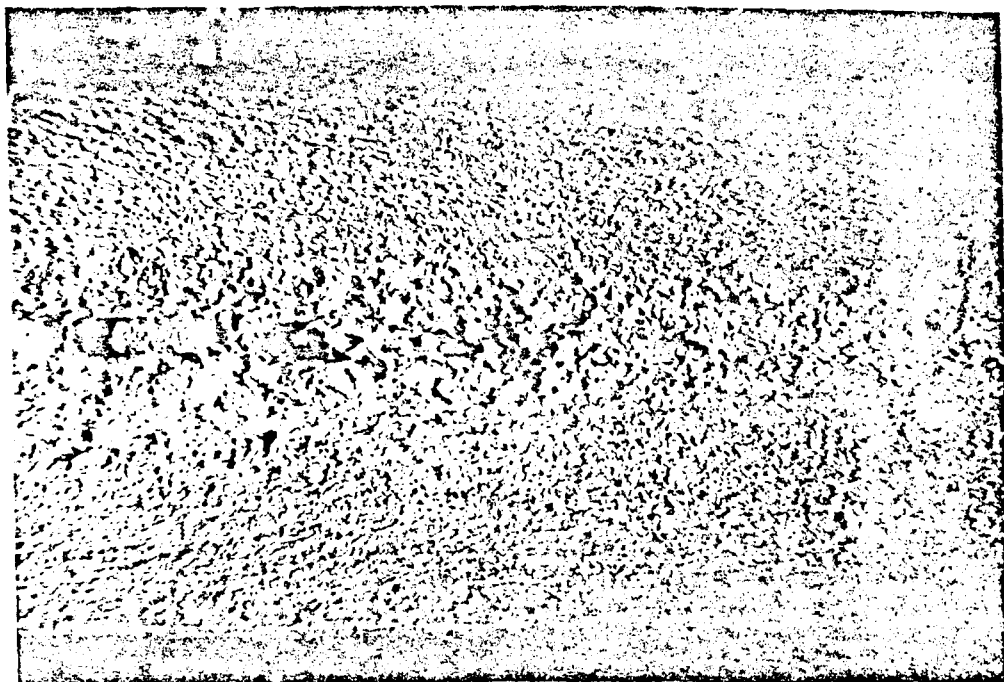


Abb. 87 Oberflächenzustand des Spanndrahtes der
Abb. 86 nach Ablösen der Korrosionspro-
dukte mit Korrosionssnarben bis zu 350µ
Tiefe. V ~ 10-fach

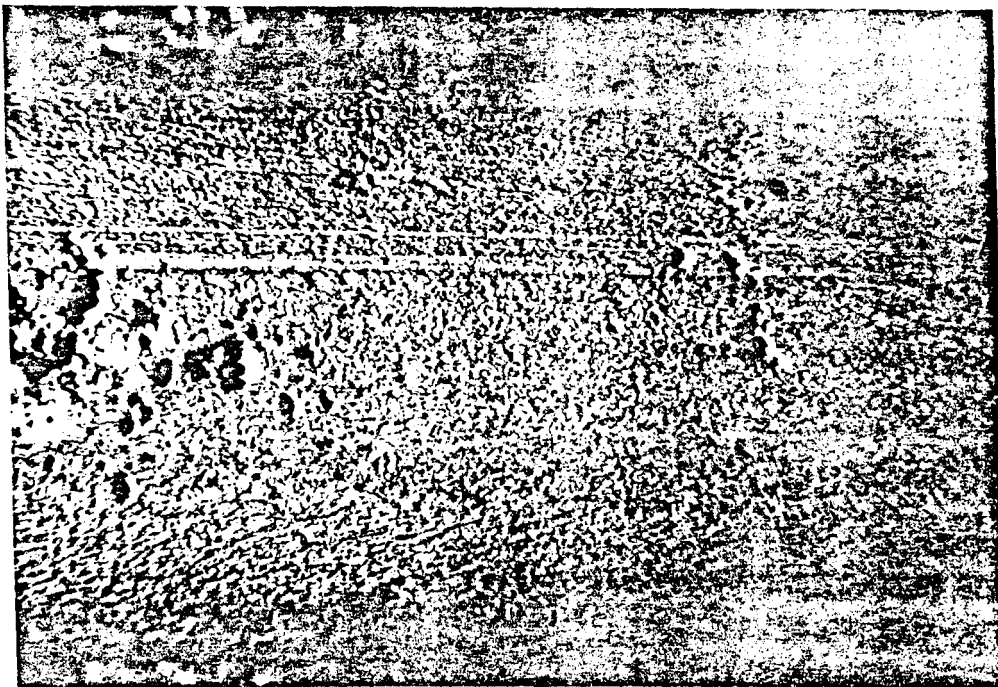


Abb. 88 Korrosionsnarben auf einer Spanndraht-
oberfläche aus den unvollständig ver-
preßten Hüllrohrabschnitten mit Narben-
tiefen bis 250µ. V ~ 10-fach

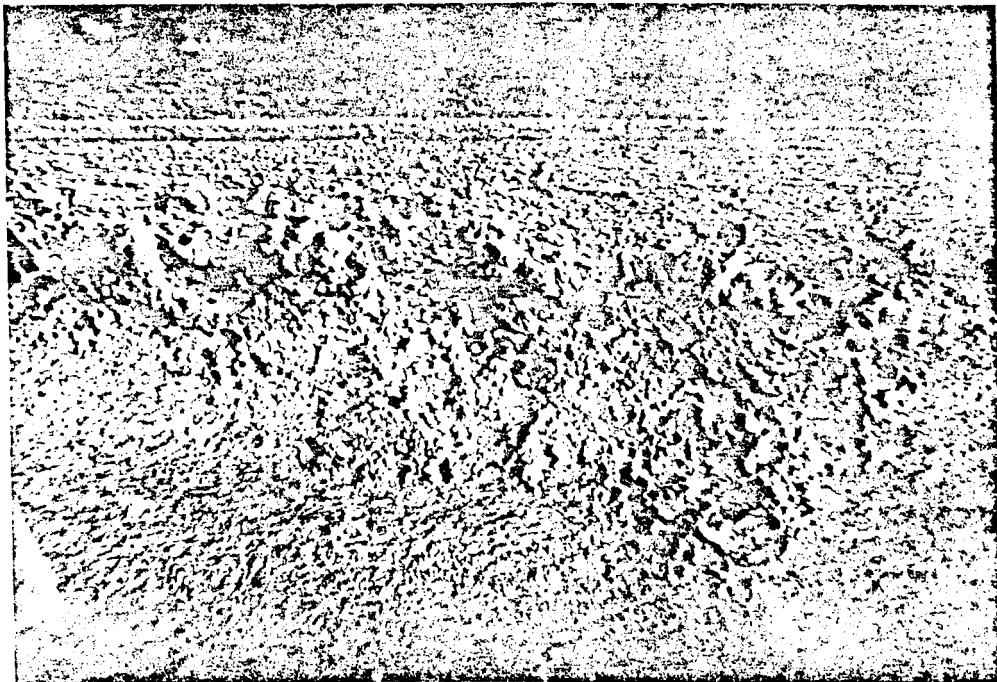


Abb. 89 Korrosionsnarben mit Tiefen bis zu 450 µ
im Bereich der Berührungslinie zweier
Spanndrähte aus einem unvollständig
verpreßten Hüllrohrabschnitt. V ~ 10-fach

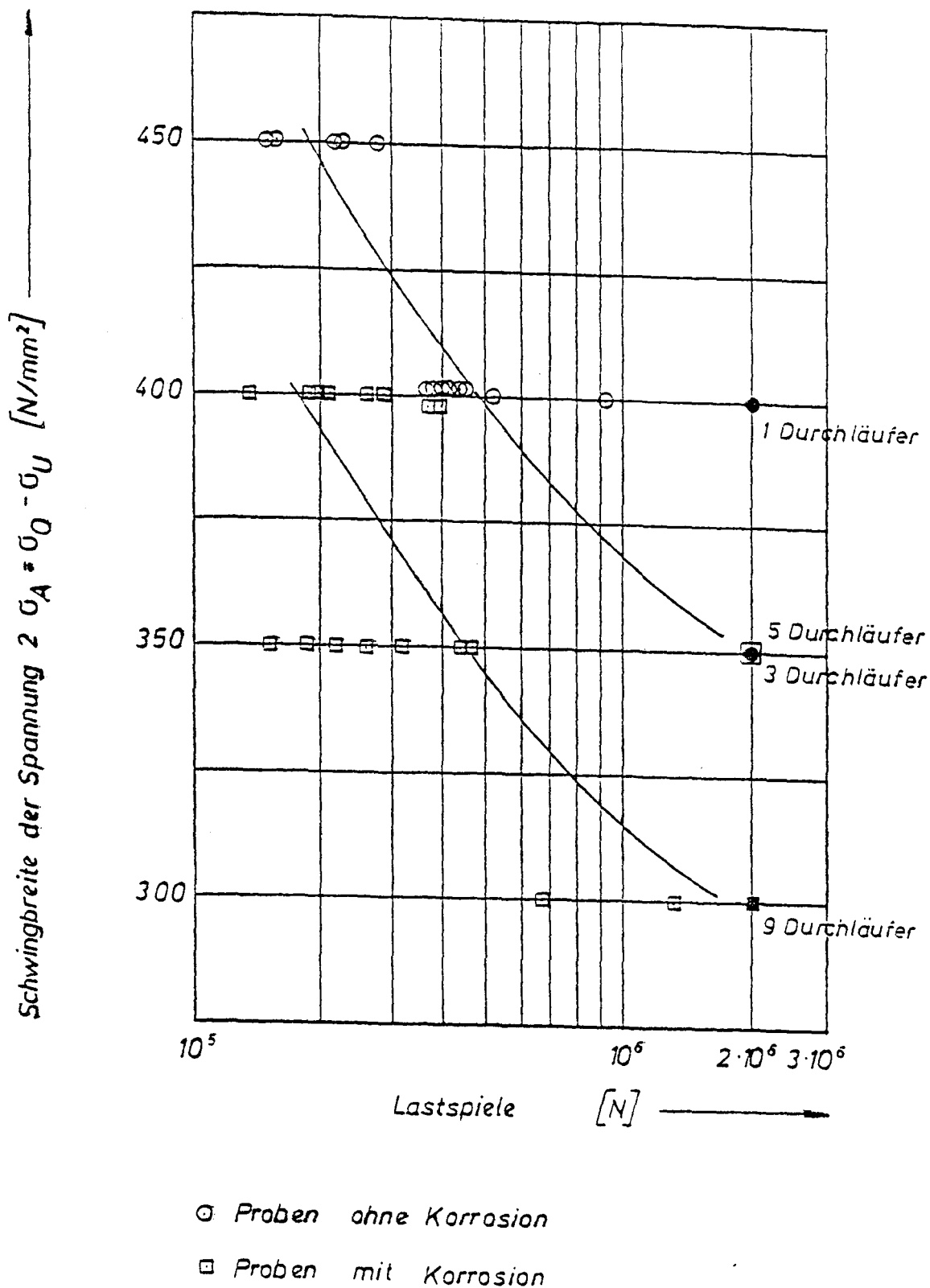


Abb. 90 Ergebnisse der Dauerschwingversuche an korrosionsfreien Proben mit vollständiger Verpreßmörtelumhüllung und an korrodierten Proben mit vereinzelten bis zu 100 μ tiefen Narben bzw. mit vielen bis zu 450 μ tiefen Narben aus unvollständig verpreßten Hüllrohrabschnitten ohne Einwirkung von außen kommender Feuchtigkeit oder korrosionsfördernder Salze

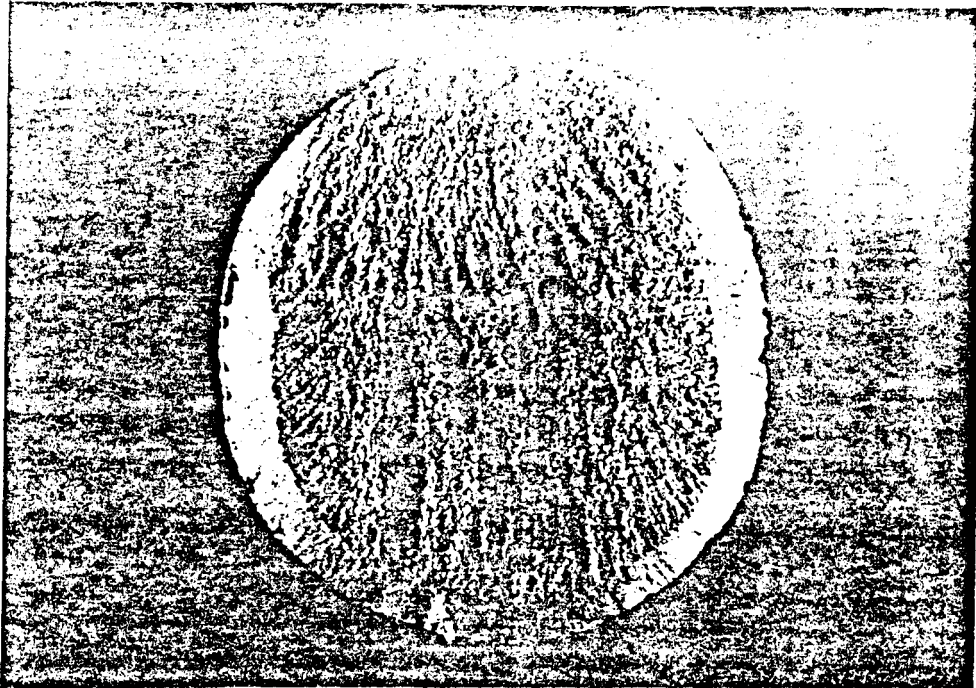


Abb. 91 Dauerbruchfläche mit Narbe am Bruchausgang
bei ~ 10 -facher Vergrößerung

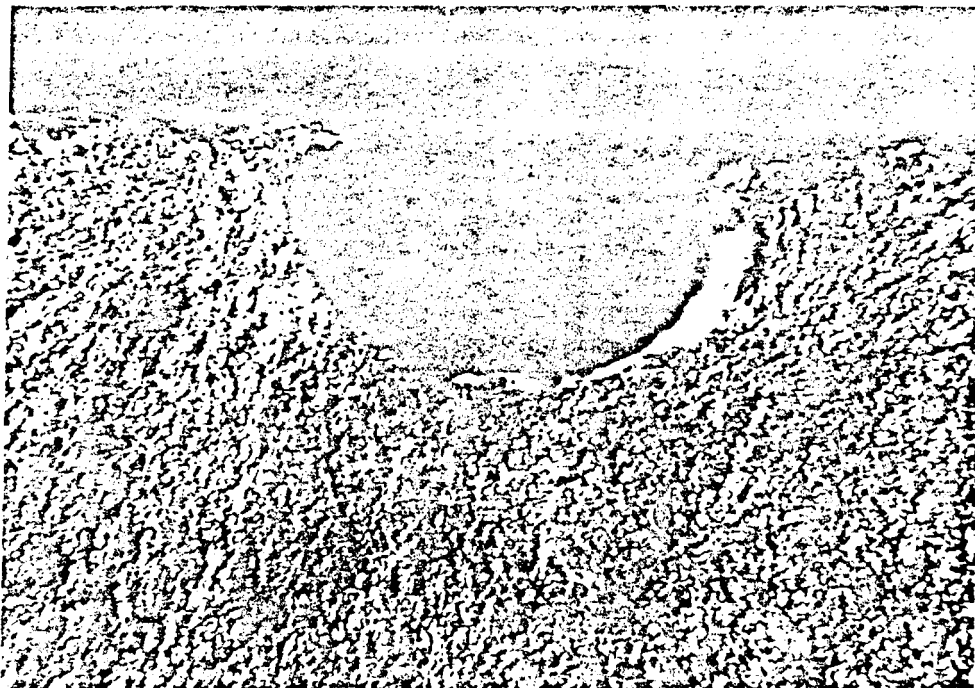


Abb. 92 Narbe am Ausgang des Dauerbruchs der
Abb. 91. Narbentiefe ca. 380μ , $V \sim 80$ -fach

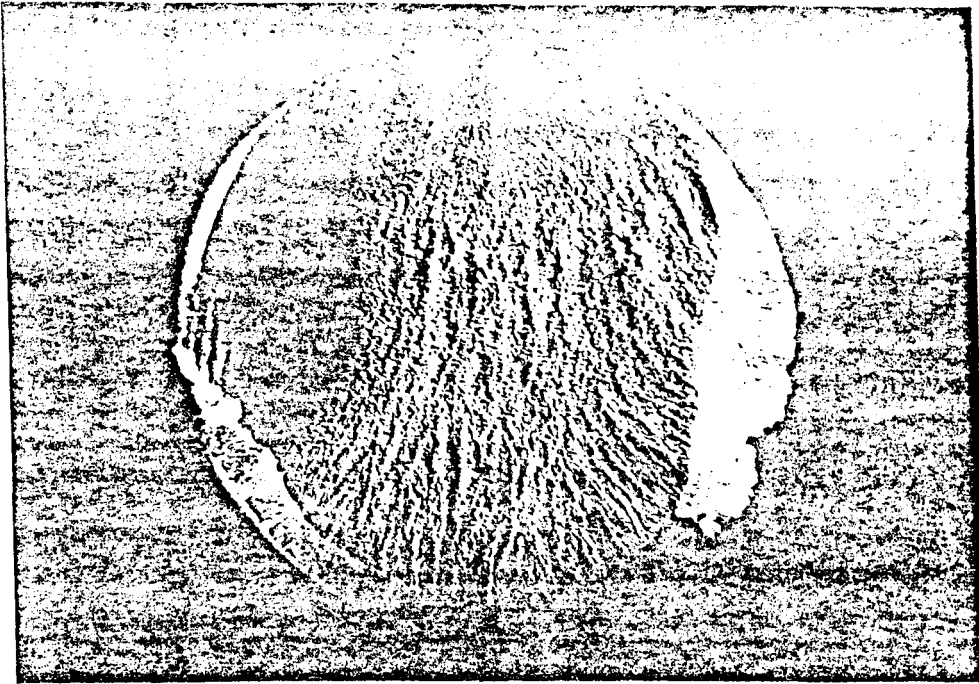


Abb. 93 Dauerbruchfläche mit Narben am Bruch-
ausgang bei ~ 10 -facher Vergrößerung

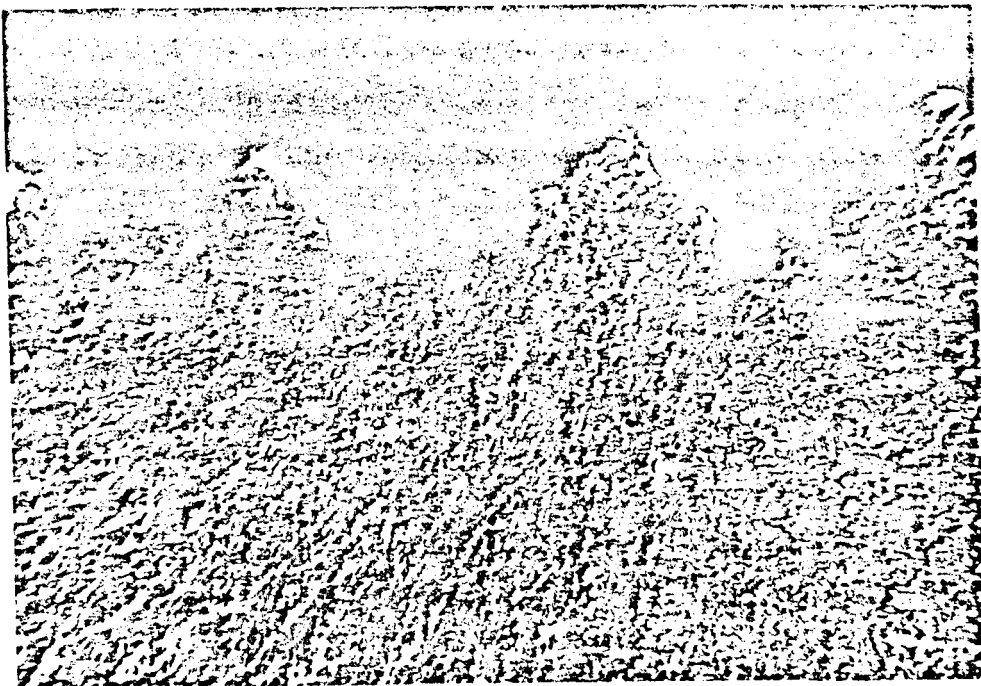


Abb. 94 Narben am Ausgang des Dauerbruchs der
Abb. 93. Narbentiefen ca. 250 - 300 μ ,
 $v \sim 80$ -fach

Bei den Dauerschwingversuchen ergab sich zwar eine deutliche Differenzierung zwischen korrosionsfreien und korrodierten Proben, jedoch erstaunlicherweise keine Differenzierung zwischen den leicht korrodierten Proben mit vereinzelt Narben (bis 100µ tief) und den stärker korrodierten Proben mit vielen Narben (bis 450µ tief).

Das Ergebnis der Dauerschwingversuche ist in den Wöhlerkurven der Abb. 90 dargestellt. Der Abfall in der Dauerschwingfestigkeit korrodierten Proben mit Narben bis zu 450µ Tiefe gegenüber korrosionsfreien Proben beträgt danach etwa 15 %. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Lastspielzahl und Narbentiefen war nicht feststellbar.

Typische Dauerbruchflächen mit den zugehörigen, den Dauerbruch auslösenden Narben zeigen die Abbildungen 91-94 bei 10- bzw. 80-facher Vergrößerung.

4.6.3.5 Zusammenfassende Wertung zum Zustand des Spannstahls aus dem Brückenbauwerk Bergheimer-Straße, B 477/BAB-A57 bei Neuß

Die warmgewalzten und vergüteten Sigma-Spannstähle St 135/150 (St 1320/1470), rund, glatt, Ø 8 mm zeigten nach 20-jähriger Nutzung im Bauwerk und vollständiger Umhüllung mit Verpreßmörtel keine nachweisbaren Einbußen ihrer mechanisch-technologischen Gütekenneiwerte.

Spannstähle aus unvollständig verpreßten Hüllrohrbereichen mit schaumiger Verpreßmörtelstruktur oder flachen, langgestreckten Fehlstellen wiesen in der Regel Korrosionsstreifen im Bereich der Berührungslinien benachbarter Stähle auf. Obwohl nachträglich in diese Fehlstellen weder Feuchtigkeit noch korrosionsfördernde Salze eindringen konnten, bildeten sich im Bereich der Korrosionsstreifen Narben mit Tiefen bis zu 450µ.

Eine Auswirkung dieser Narben auf die Festigkeitskennwerte und die Bruchdehnung wurde nicht festgestellt. Die Dauerschwingfestigkeit der korrodierten Proben nahm gegenüber den

korrosionsfreien Proben um ca. 15 % ab. Dabei fiel auf, daß sich bei den Dauerschwingversuchen keine eindeutige Differenzierung zwischen Proben mit vereinzelt Narben (bis 100µ tief) und Proben mit vielen Narben (bis 450µ tief) ergab.

Die Restvorspannung konnte nicht gemessen werden.

4.7 Herrenbrücke in Lübeck

4.7.1 Angaben zum Bauwerk

Die Herrenbrücke in Lübeck überführt die B75 über die Trave. Sie wurde Anfang der sechsziger Jahre gebaut und 1964 dem Verkehr übergeben. Das Bauwerk besteht aus zwei Vorlandbrücken und einem aufklappbaren Abschnitt über der Trave. Die beiden Vorlandbrücken mit 4 bzw. 8 Feldern, Feldlänge jeweils 35 - 40 m, sind Spannbetonkonstruktionen. Die Fahrbahnplatte ist als vierstegiger, 27 m breiter Plattenbalken ausgeführt, der in Längs- und Querrichtung vorgespannt ist. Für das Aufbringen der Vorspannung wurde das Spannverfahren "SAWÖ" eingesetzt, wobei Spannglieder aus jeweils 6 Sigma-Spannstählen St 125/140 (St 1230/1370), rund, glatt, \varnothing 12,2 mm in gewellten Hüllrohren zur Anwendung kamen. Einen Querschnitt durch die Fahrbahnplatte zeigt Abb. 95.

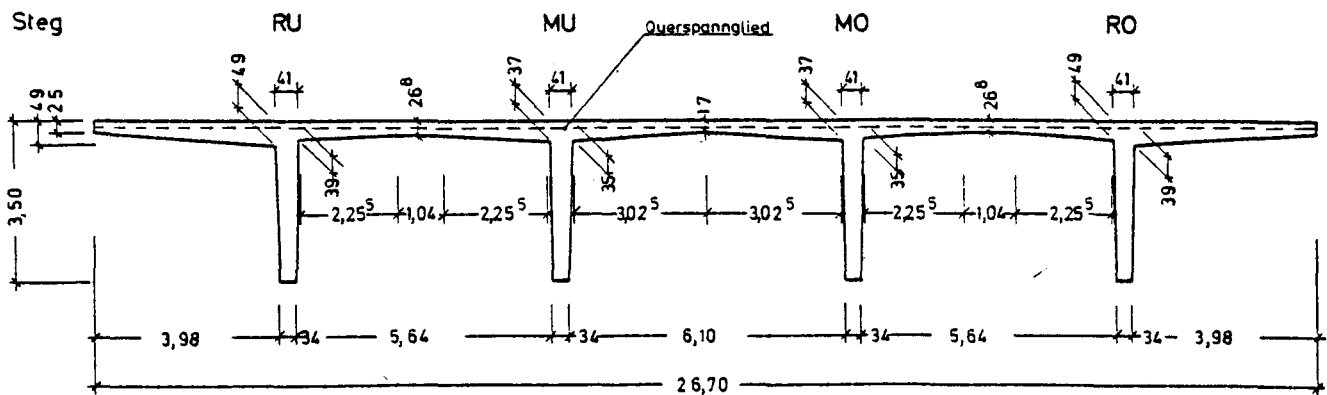


Abb. 95 Querschnitt durch die Fahrbahnplatte der Herrenbrücke in Lübeck

Seit der Verkehrsübergabe waren mehrfach bauliche Maßnahmen - wie "Nachverpressen von Spanngliedern", "Verschließen von Rissen in den Hauptträgern" etc. - erforderlich, um die Gebrauchsfähigkeit der Brücke zu erhalten. Bei einer sorgfältigen Bauwerksinspektion im Jahre 1977 wurden erneut Schäden und weitere unverpreßte Spannglieder festgestellt, was dann zu umfangreichen Materialuntersuchungen im Jahre 1978 führte.

Gründe für einen Abbruch des Tragwerks fanden sich dabei nicht, so daß die Herrenbrücke - nach umfangreichen Sanierungsmaßnahmen - weiterhin genutzt werden kann.

4.7.2 Beton des Überbaus

Die Betonfestigkeiten wurden an Bohrkernen mit 10 cm bzw. 15 cm Ø aus der Fahrbahnplatte, aus Randträgern und Druckplatten in Pfeilernähe bestimmt. In der Fahrbahnplatte ergaben sich Festigkeiten zwischen 40 N/mm^2 und 60 N/mm^2 , mit einem Mittelwert bei 53 N/mm^2 . Die entsprechenden Werte aus Randträgern bzw. Druckplatten lauten 42 N/mm^2 - 58 N/mm^2 mit dem Mittelwert 50 N/mm^2 bzw. 29 N/mm^2 und 40 N/mm^2 mit dem Mittelwert 34 N/mm^2 . Die spanngliedführenden Bauteile "Fahrbahnplatte" und "Randträger" weisen demnach Festigkeiten von mindestens 40 N/mm^2 auf. Bei Stemmarbeiten an der Fahrbahnplattenoberseite wurden auffällige Betonierfehler wie Verdichtungsmängel und Hohlräume nicht gefunden.

Der Cl-Gehalt des Fahrbahnbetons unmittelbar oberhalb der Spannglieder beträgt i.M. 0,23 Masse-% bezogen auf den Zementgehalt. Dieser Wert erreicht gerade die für Spannbeton zulässige Obergrenze. Auf der Fahrbahnplattenoberseite konnten unter der Abdichtung keine nennenswerten Karbonatisierungstiefen festgestellt werden. An den Seitenflächen der Längsträger ergaben sich jedoch Karbonatisierungstiefen zwischen 5 - 10 mm mit Spitzenwerten um 20 mm. Die Spannglieder waren davon jedoch nicht erreicht.

4.7.3 Spannglieder und Spannstahl

Die eingebauten Spannglieder des Spannverfahrens "SAWÖ" bestehen aus jeweils 6 warmgewalzten, vergüteten Sigma-Spanndrähten St 125/140 (1230/1370) rund, glatt, Ø 12,2 mm, die in spiralförmig gewickelte und gefaltete Hüllrohre von ca. 40 mm Innendurchmesser eingebaut sind. Der Ausbau von Spanndrahtabschnitten erfolgte auf der Fahrbahnplattenoberseite durch Freistemmen mit dem Preßlufthammer. Anschließend wurden die ca. 1,30 m bis 1,50 m langen Spanndrahtabschnitte mit der Trennscheibe herausgeschnitten (vgl. Abb. 96).

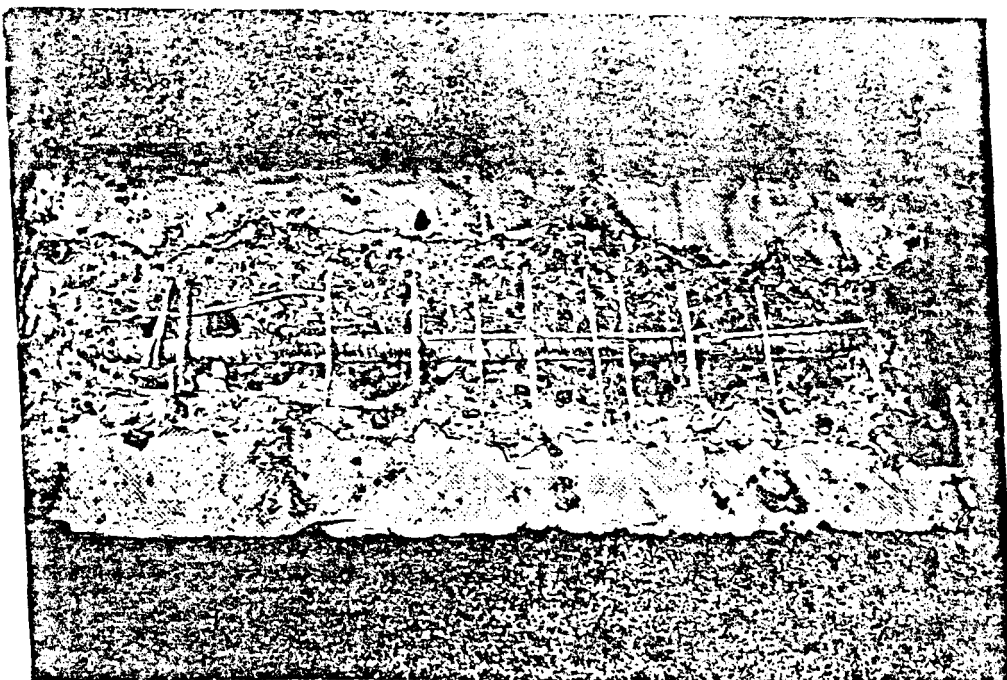


Abb. 96 Freilegen von Querspanngliedern auf der
Fahrbahnplattenoberseite mit dem Preßluft-
hammer

4.7.3.1 Zustand der Hüllrohre

Die Hüllrohre bestanden aus einem spiralförmig gewickelten Blechstreifen, der mittig eine Sicke enthielt. Durch diese Art der Herstellung ergab sich ein Wellrohr mit spiralig umlaufender Welle bzw. spiralig umlaufendem Falz, was beides für den Verbund mit dem Beton sorgt.

Vollständig ausgepreßte Hüllrohre waren innen und außen korrosionsfrei und z.T. noch metallisch blank (vgl. Abb. 97 u. 98). Unverpreßte Hüllrohre, die mit Wasser teilgefüllt waren oder in die gelegentlich Wasser eindringen konnte, waren von innen nach außen durchkorrodiert (vgl. Abb. 99). Vereinzelt wurden Spannglieder gefunden, die vollständig mit Wasser gefüllt waren. Wohl infolge Sauerstoffabschluß waren hier die Hüllrohrinnen-seiten fast noch metallisch blank bzw. wiesen nur unbedeutenden Oberflächenrost auf (vgl. Abb. 100).



Abb. 97 Zustand einwandfrei verpreßter Hüllrohre
von außen

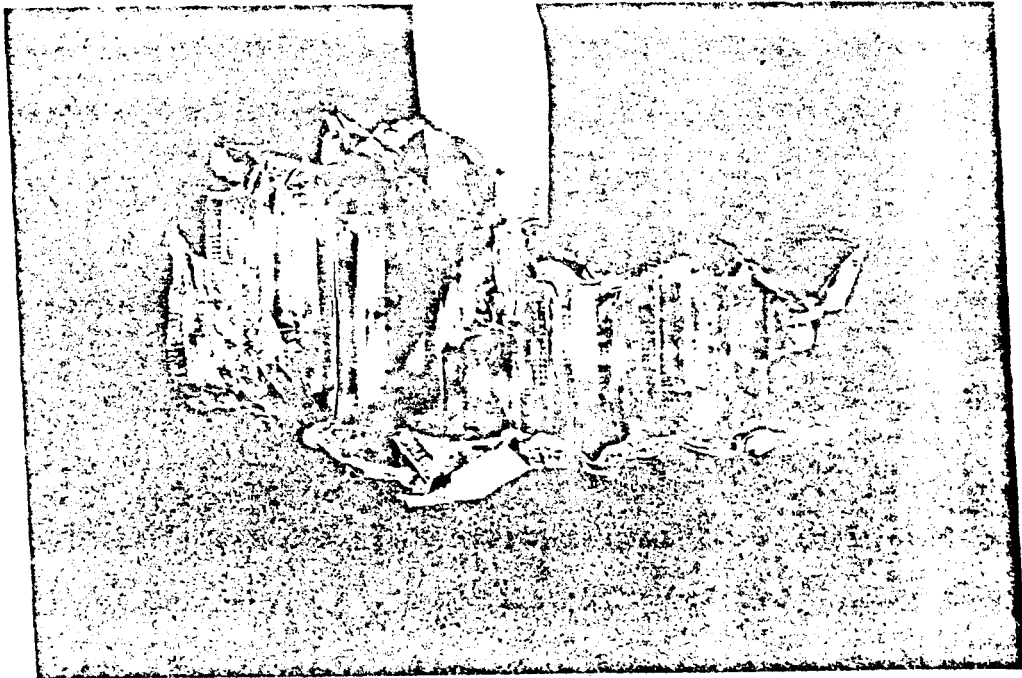


Abb. 98 Hüllrohrinnenseiten zeigen nach Entfernung
des Verpreßmörtels eine metallblanke Ober-
fläche

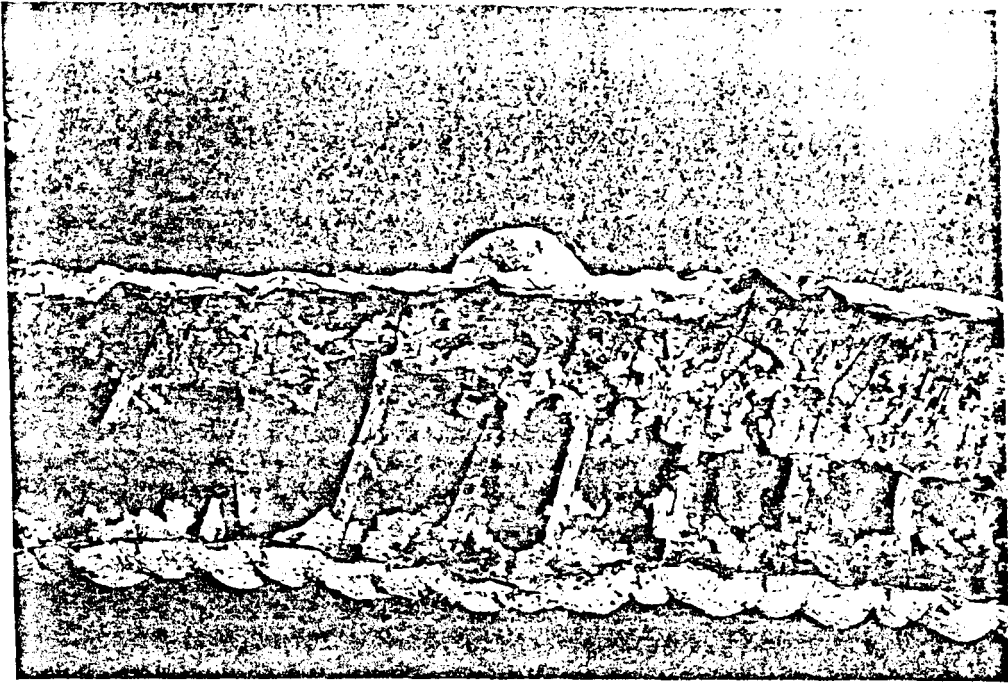


Abb. 99 Von innen nach außen durchgerostetes Hüllrohr, in das infolge fehlender Verpressung wiederholt Wasser eindringen konnte



Abb. 100 Vollständig mit Wasser ausgefülltes, unverpresstes Spannglied. Infolge Sauerstoffabschluß sind die Hüllrohrinnenseiten fast noch metallblank

4.7.3.2 Verpreßmörtel und Zustand der Verpressung

Bei der Öffnung der Spannglieder wurden sehr unterschiedliche Verpreßzustände angetroffen. Neben völlig verpreßten Spanngliedern mit der üblichen Struktur von Wasser/Zement-Verpreßmörteln (vgl. Abb. 101) fanden sich teilverpreßte Hüllrohre mit großblasiger Struktur im oberen Hüllrohrdrittel (vgl. Abb. 102) sowie völlig unverpreßte Hüllrohre.

Gelegentlich wurden Spannglieder angetroffen, die zwar vollständig verpreßt waren, in denen der Verpreßmörtel jedoch eine schmierige, tonige Konsistenz aufwies. Dabei war volle Alkalität vorhanden und keine Korrosion aufgetreten (vgl. Abb. 10).

Abbildung 104 zeigt Verpreßmörtelstücke, die aus einem etwa 1970 unter Vakuum nachverpreßten Hüllrohr stammen. Hier sind deutlich die Schwierigkeiten zu erkennen, die bei einer nachträglichen Ummantelung der Drahtoberflächen wegen der bereits gebildeten, voluminösen Rostprodukte entstehen.

Die Verpreßmörtelproben ergaben unabhängig von Konsistenz und Herkunft aus dem Bauwerk Cl-Gehalte um 0,02-Masse-%. Es handelt sich hier mit Sicherheit um den völlig unkritischen Ausgangsgehalt aus Zement und Anmachwasser.

4.7.3.3 Ordnung im Hüllrohr

Die Spanndrähte lagen immer wie ursprünglich geplant im Hüllrohr (ringförmig angeordnet, um einen Kernhohlraum herum, in dem gerade noch ein gleicher Draht Platz gehabt hätte). Aufgrund von Hüllrohrgeometrie und Ausfüllung des Querschnitts mit Spannstahl ist dieses Ordnungsprinzip vorgegeben und demnach auch nur wenig störanfällig.

4.7.3.4 Zustand des Spannstahls

Da die Zahl der entnommenen Stahlproben vergleichsweise klein, ihre Entnahmeorte sich zudem hinsichtlich Verpreßzustand und Korrosionsbeanspruchung sehr stark unterschieden, war eine Klasseneinteilung der entnommenen Stähle schwierig. Neben augenscheinlich korrosionsfreien Proben aus vollständig ausgepreßten Hüllrohren und ohne erkennbare Narben lagen Proben

aus teilverpreßten, aber trockenen Hüllrohren - z.T. mit Linienkorrosion - sowie Proben aus teilverpreßten oder völlig unverpreßten Hüllrohren vor, in denen offenbar fortdauernd oder wenigstens zeitweise ausreichendes Sauerstoff- und Feuchteangebot vorhanden war, so daß Korrosionsnarben bis zu 2 mm Tiefe und 10 mm Durchmesser entstehen konnten. Einen Eindruck vom Oberflächenzustand der Proben, abhängig von ihrer Herkunft vermitteln die Abbildungen 105 - 110.

Die an derartigen Proben ermittelten Festigkeitskennwerte sind im Vergleich zur Spannstahlzulassung von 1963 in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Materialzustand	$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A_{10} %	Ag %
Neu (Zulassung)	1230	1370	6,0	-
korrosionsfrei Narben bis 200µ Narben bis 700µ } }	1236	1391	7,2	4,5

Trotz der beobachteten, vergleichsweise großen und tiefen Narben, waren nach insgesamt 14-jähriger Nutzungsdauer noch keine Brüche aufgetreten.

Die Dauerschwingversuche reagierten naturgemäß empfindlicher auf die Korrosionsschäden der Drähte. Korrosionsfreie Proben aus vollständig verpreßten Hüllrohren ertrugen bei einer Ober-
spannung $\sigma_o = 0,55 R_m$ und einer Schwingbreite $\Delta\sigma = 350 \text{ N/mm}^2$ (entsprechend Smith-Diagramm der Zulassung) 2×10^6 Lastwechsel ohne Bruch. Eine Abminderung der Dauerschwingfestigkeit derartiger Proben kann daher ausgeschlossen werden. Bei Proben mit Narbentiefen bis zu 500µ traten unter den gleichen Prüfbedingungen Brüche nach ca. 1×10^6 bis $1,3 \times 10^6$ Lastwechseln auf.

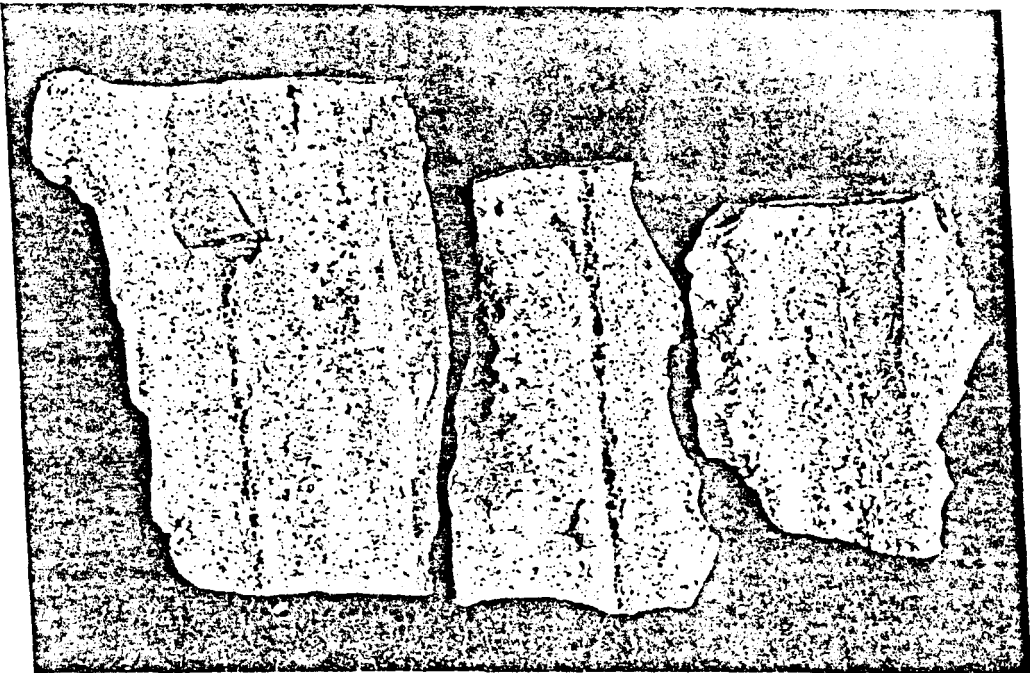


Abb. 101 Struktur des Verpreßmörtels in einem vollständig ausgepreßten Spannglied. Auffällig ist hier die bevorzugte Bläschen- bzw. Porenbildung in den Zwickeln zwischen zwei Drähten. $V \sim 2$ -fach



Abb. 102 Teilverpreßtes Hüllrohr, das im oberen Querschnittsdrittel nur mit einem weißen großblasigen Mörtel verfüllt war. Die Folge war Linienkorrosion längs der Kontaktstellen zwischen zwei Drähten

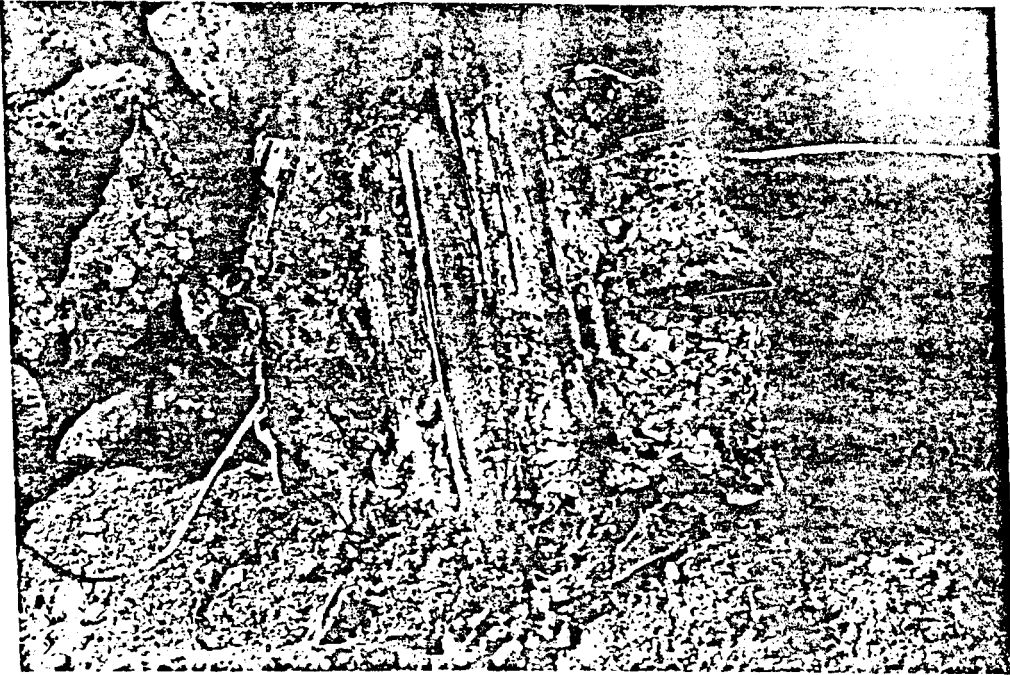


Abb. 103 Hellweißer Verpreßmörtel von schmierig-toniger Konsistenz, ohne Nachteile für Spannstahl und Hüllrohr

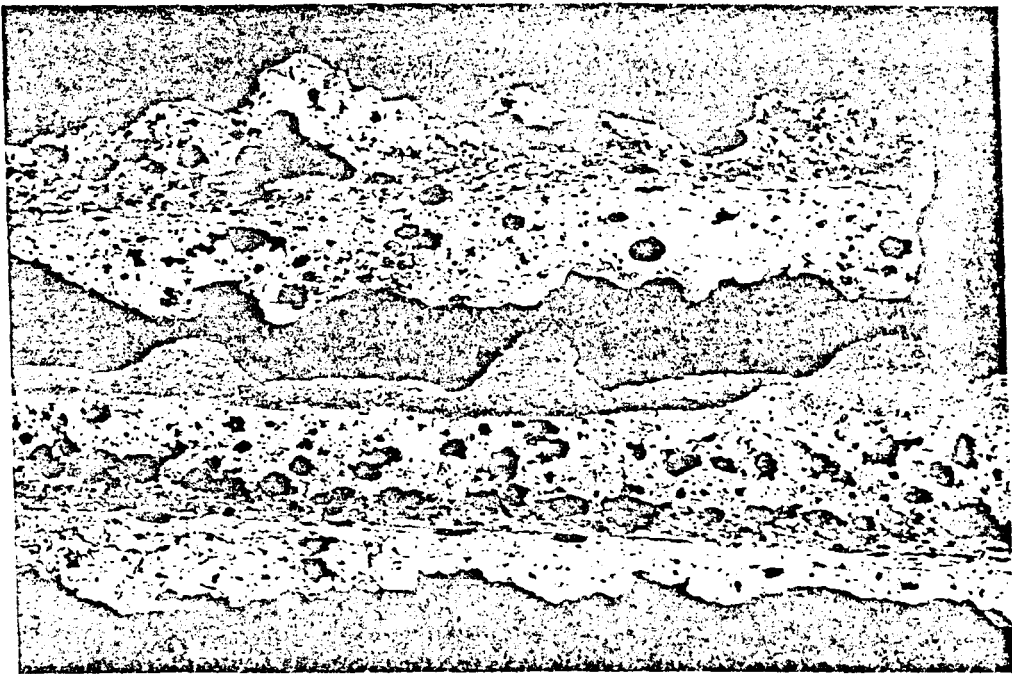


Abb. 104 Verpreßmörtelstücke einer Vakuumnachverpressung. Die bereits auf dem Stahl vorhandenen großvolumigen Rostprodukte behindern eine vollständige Ummantelung der Stahloberfläche mit Mörtel

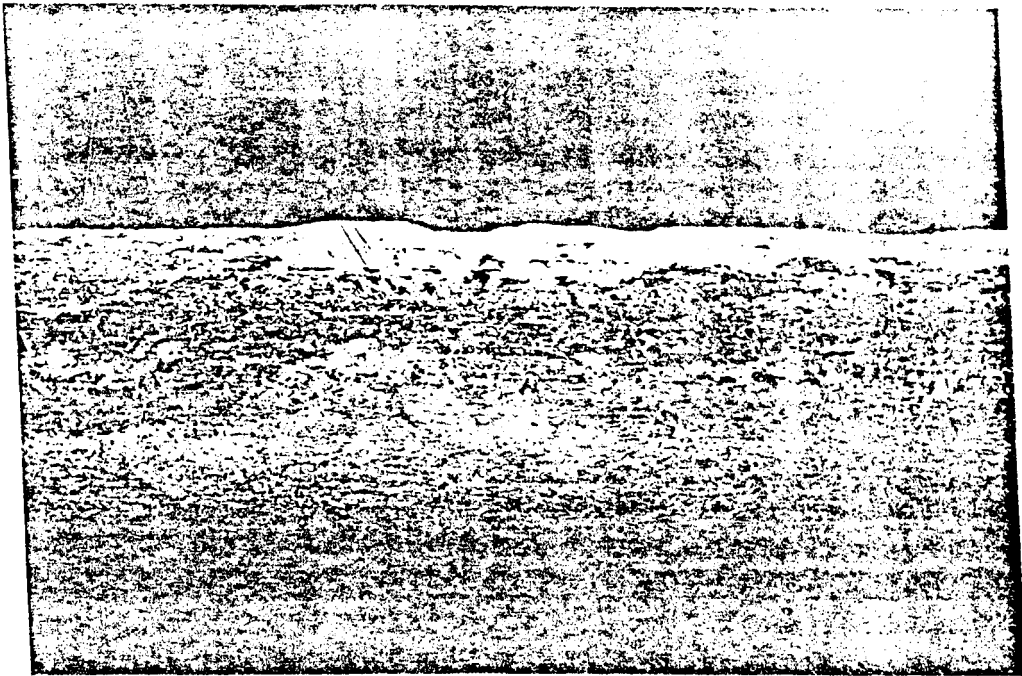


Abb. 105 Spannstahl aus einem einwandfrei verpreßten Hüllrohr ohne augenscheinlich erkennbare Korrosion. $V \sim 3,5$ -fach

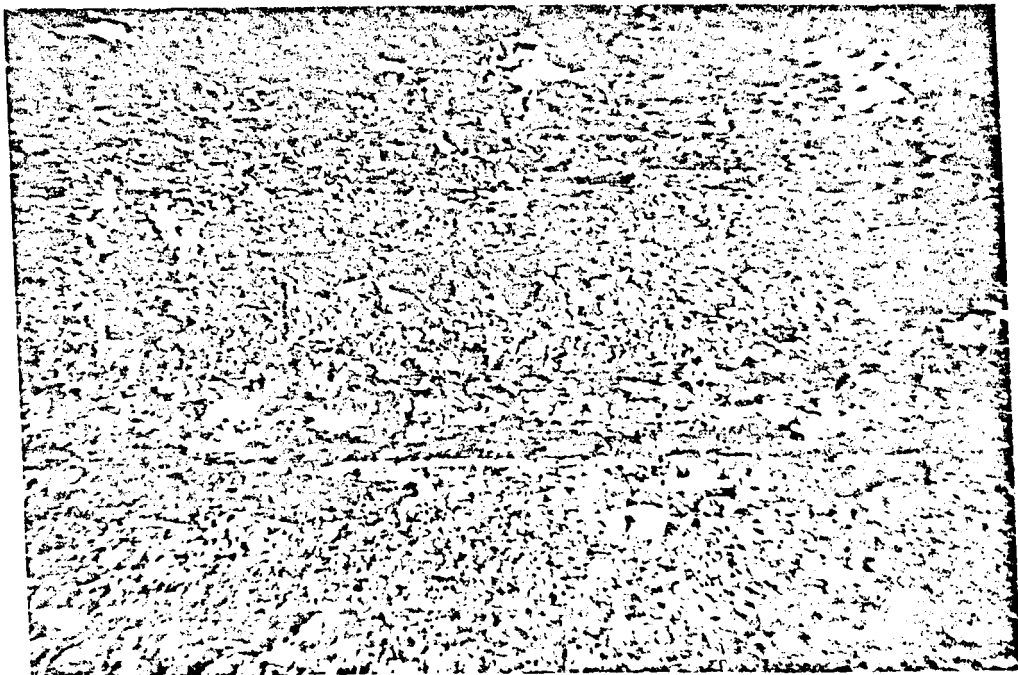


Abb. 106 Oberfläche eines Spannstahls aus einem vollständig verpreßten Hüllrohr. Deutlich sind noch Reste der Walzhaut zu erkennen. Korrosion liegt nicht vor. $V \sim 10$ -fach

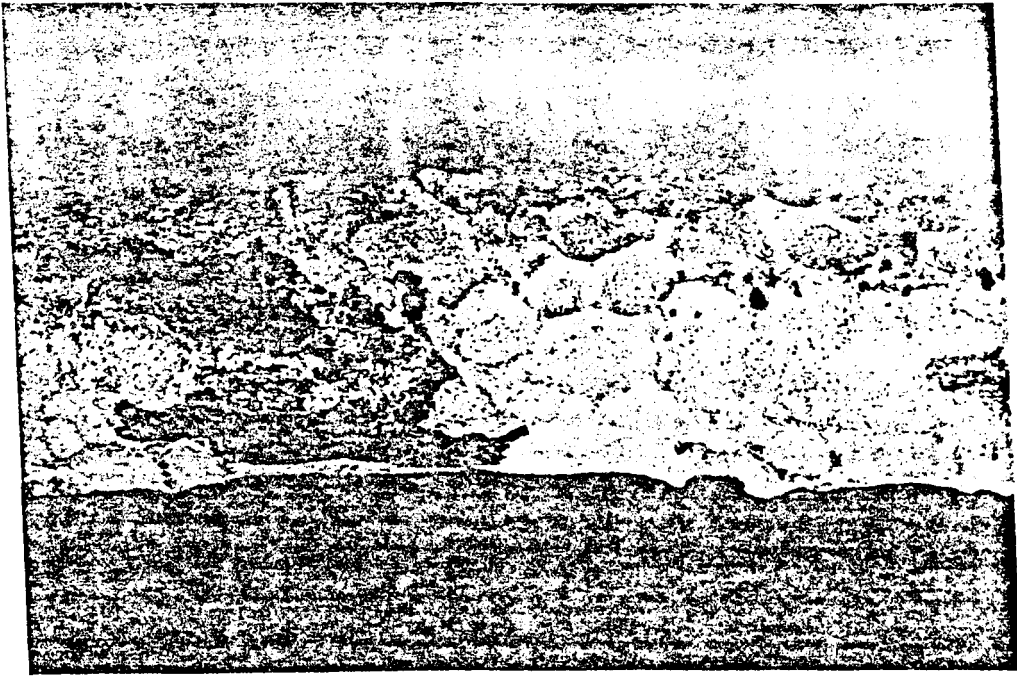


Abb. 107 Spannstahl aus einem teilverpreßten, trockenen Spannglied. Keine augenscheinlich erkennbare Korrosion (vgl. jedoch Abb. 108). $V \sim 3,5$ -fach

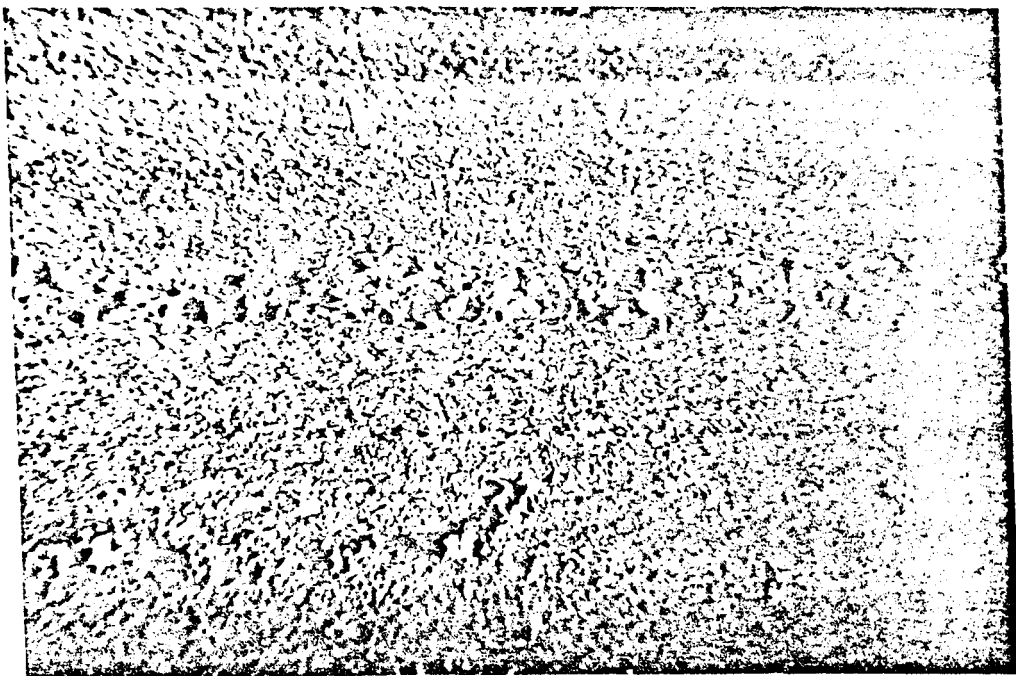


Abb. 108 Korrosionsnarben längs der Berührungslinie zwischen zwei Spanndrähten eines teilverpreßten Hüllrohres (vgl. Abb. 102 u. 107). Die Narben sind zwischen 60µ und 130µ tief. $V \sim 10$ -fach

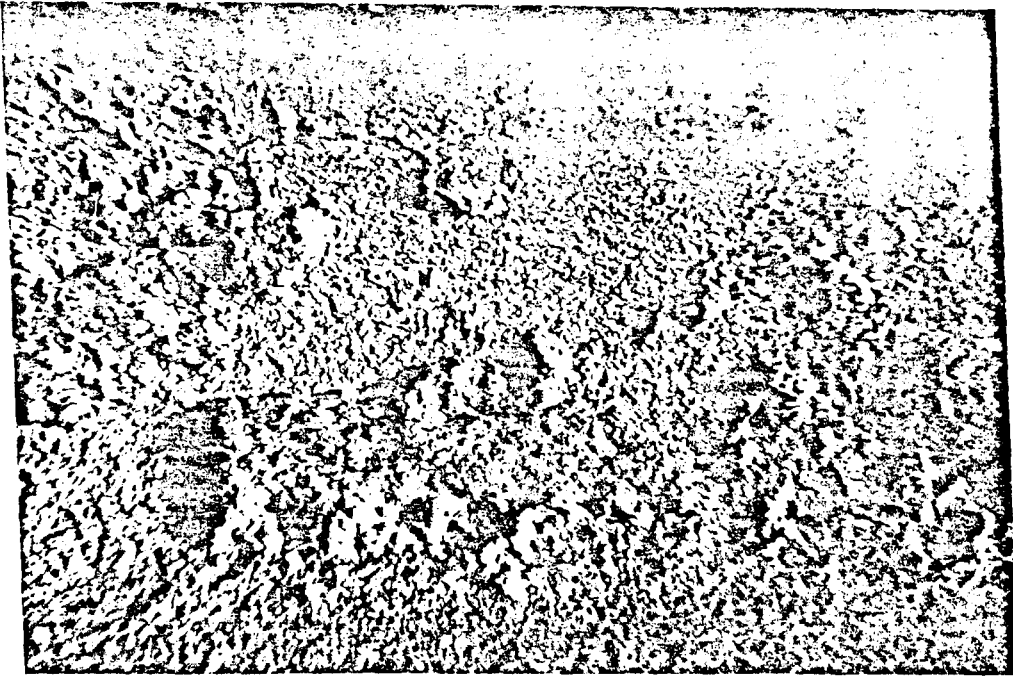


Abb. 109 Korrosionsnarben auf der Oberfläche eines Spannstahls aus einem unverpreßten Spannglied, das wenigstens zeitweise Feuchte enthielt. Narbentiefen hier bis 700μ . $V \sim 10$ -fach

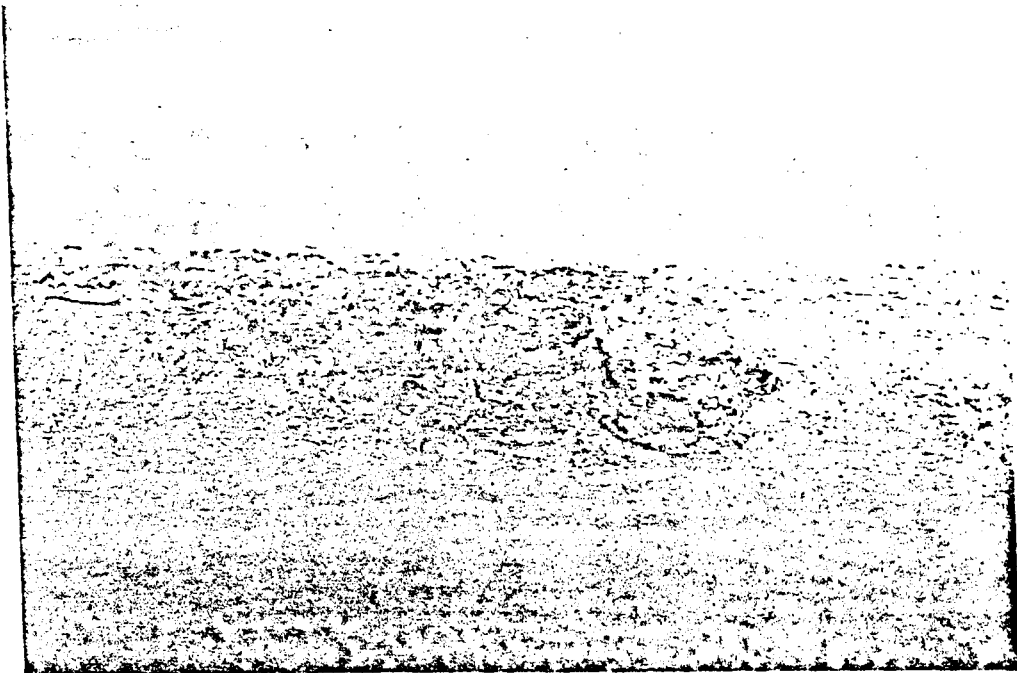


Abb. 110 Tiefe (~ 2 mm) und große Korrosionsnarbe ($\varnothing \sim 10$ mm) auf der Oberfläche eines Spannstahls aus einem unverpreßten Spannglied, das wenigstens zeitweise Feuchtigkeit enthielt. $V \sim 3,5$ -fach

Proben mit Narbentiefen $> 1 \text{ mm}$ brachen nach $0,5 - 0,8 \times 10^6$ Lastwechseln. Daraus lassen sich in erster Näherung Abminderungen der Dauerschwingfestigkeit um $30 - 50 \%$ bzw. um $60 - 70 \%$ abschätzen. Wegen geringer Probenzahlen konnten keine vollständigen Wöhlerdiagramme ermittelt werden.

Bei einer größeren Anzahl von Spanndrahtentnahmen konnte die Restvorspannung durch aufgeklebte Dehnmeßstreifen ermittelt werden. Es ergaben sich bei 14 Messungen Stahldehnungen zwischen $2,8$ und $3,3 \%$ mit einem Mittel von $3,0 \%$, was einen Spannungsverlust nach 14-jähriger Nutzung aus Schwinden und Kriechen des Betons und aus Spannstahlrelaxation von etwa 18% entspricht.

4.7.3.5 Zusammenfassende Wertung zum Langzeitverhalten der Spannstähle aus der Herrenbrücke in Lübeck

Nach 14-jähriger Nutzungsdauer zeigten die warmgewalzten und vergüteten Sigma-Spannstähle St 125/140 (1230/1370), rund, glatt, $\varnothing 12,2 \text{ mm}$, aus einwandfrei verpreßten Hüllrohren keine meßbaren Abminderungen ihrer mechanisch-technologischen Gütekennwerte aus statischem Zugversuch und Dauerschwingversuch.

Auch bei Proben mit Narben aus teilverpreßten, trockenen Hüllrohren (Narbentiefe bis 200μ) oder unverpreßten, zeitweise auch feuchten Hüllrohren (Narbentiefe bis 700μ) konnte im Zugversuch ($R_{po,2}$, R_m , A_{10}) noch keine Abminderungen der Kennwerte festgestellt werden. Aus Dauerschwingversuchen ließen sich für derartige Proben jedoch Abminderungen von 50% abschätzen. Proben mit größeren Narbentiefen ergaben Abminderungen um 70% .

Brüche durch Spannungsrißkorrosion oder durch Querschnittsabrostung wurden noch nicht vorgefunden, es ist jedoch davon auszugehen, daß unter den vorgefundenen Bedingungen in feuchten, unverpreßten Spanngliedern Überlastungsbrüche durch Abrostung der Querschnitte auftreten werden.

Restvorspannungsmessungen ergaben nach 14-jähriger Nutzungsdauer einen Spannungsverlust von insgesamt 18% . Die genaue Ermittlung des Stahlanteils infolge Relaxation war nicht möglich.

4.8 Brückenbauwerk 7728/Os 4.6, Überführung der Belmer-Straße im Zuge der BAB-A33 in Osnabrück

4.8.1 Angaben zum Bauwerk

Bei dem Bauwerk handelt es sich um eine 1965/66 erbaute Dreifeldbrücke mit einem 19 m langen Mittelfeld und zwei je 11 m langen Endfeldern. Der Überbau ist als zweistegiger, längs vorgespannter Plattenbalken von 16 m Breite ausgebildet. In jedem der 4 m breiten und etwa 60 cm hohen Stege liegen 11 Spannglieder vom Typ BBRV 116 mit jeweils 42 m Länge parallel nebeneinander (vgl. Abb. 111). Die Spannglieder enthalten jeweils 48 kaltgezogene Spanndrähte der Güte St 150/170 (St 1470/1670) rund, glatt, \varnothing 6 mm.

Im Zuge des Ausbaus der Ortsumgehung Osnabrück - B51/65 zur BAB-A33 erwies sich die Spannweite der Brücke als zu klein, so daß sie nach Fertigstellung des Ersatzbauwerks und einer Nutzungsdauer von 14 Jahren im November 1980 durch Sprengung abgebrochen wurde. Abb. 112 zeigt die Brücke vor der Sprengung mit den aufgestemmtten Abschnitten für die Spannstahlentnahme.

4.8.2 Beton des Überbaus

Der Beton des Überbaus (zur Zeit der Ausführung war ein B30 vorgesehen) zeigte keine Auffälligkeiten wie Risse, Ausblühungen, Verdichtungsmängel oder Abplatzungen. Die Stemm- und Bohrarbeiten zur Freilegung der Spannglieder war sehr mühevoll, da der Beton sehr fest und widerstandsfähig gegenüber der Beanspruchung des Preßlufthammers war. Diese Beobachtungen berechtigten zu der Annahme, daß der Beton von sehr hoher Qualität war. Bohrkern zur Festigkeitsermittlung konnten aus Kostengründen nicht entnommen werden.

Der Ausgangsgehalt an Cl^- des Fahrbahnplattenbetons lag zwischen 0,07 und 0,1 Masse-% des Zementanteils. An der Brückenunterseite hatte sich dieser Cl-Gehalt im Tiefenbereich 0 - 1 cm durch aufgewirbeltes Tausalz von der darunterliegenden Bundesstraße ungünstigstenfalls verdoppelt. Im Tiefenbereich 2 - 4 cm hatte die Cl-Konzentration dann in der Regel bereits wieder die Ausgangskonzentration erreicht. Eine Beeinflussung der Spannglieder

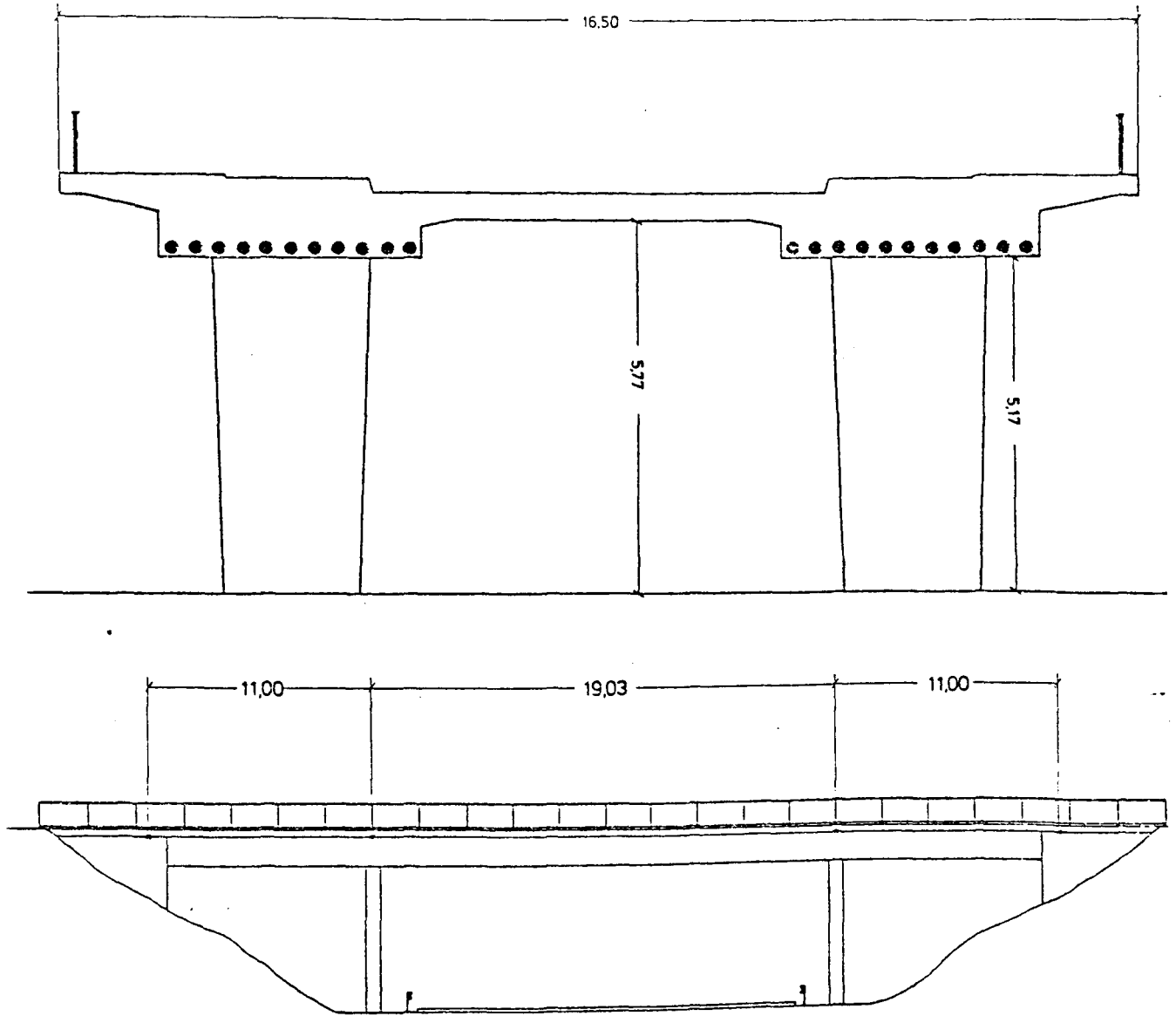


Abb. 111 Seitenansicht und Querschnitt des Brückenbauwerks 7728-Os 4.6, Überführung der Belmer-Straße über die BAB-A33 in Osnabrück

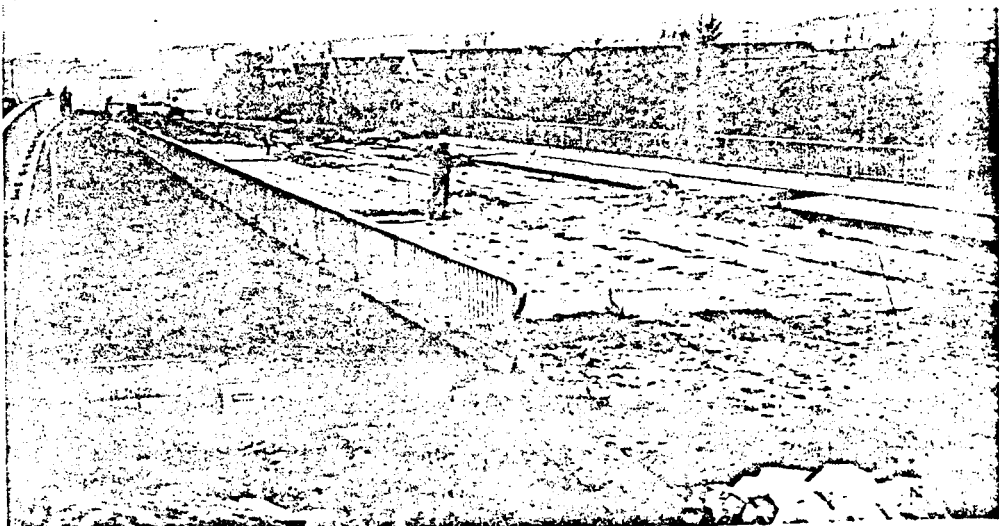


Abb. 112 Ansicht der Fahrbahnplatte vor der Sprengung mit den Öffnungsstellen zur Stahlnahme

Durch diese niedrigen Werte war auszuschließen. Höhere Cl-Gehalte ergaben sich auf der Fahrbahnplattenoberseite im Bereich der ungeschützten Radwege. Hier wurde in der oberflächennahen Zone 0 - 2 cm ein Höchstgehalt von 0,5 Masse-% Cl bezogen auf den Zementanteil ermittelt. Im Tiefenbereich größer 4 cm war aber ebenfalls in der Regel bereits wieder die niedrige Ausgangskonzentration erreicht. An die Spannglieder konnte kein Cl gelangen, da selbst an den Hochpunkten die Überdeckung noch mehr als 20 cm betrug.

Die Karbonatisierungstiefen lagen an der Brückenunterseite bei maximal 2 mm und an der Brückenoberseite i.M. bei 2 mm, maximal bei 5 mm.

4.8.3 Spannglieder und Spannstahl

Die Längsvorspannung bestand aus BBRV-Spanngliedern vom Typ 116 in die jeweils 48 kaltgezogene Spanndrähte St 150/170 (St 1470/1 rund, glatt, \varnothing 6 mm eingezogen waren. Die Entnahme von der Bauwerks oberseite her über den Hochpunkt gestaltete sich sehr schwierig, da eine Betondeckung von mehr als 20 cm Dicke entfernt werden mußte, was nur unter Einsatz von schweren Lufthämmern möglich war (vgl. Abb. 113).



Abb. 113 Entnahme von Spanngliedabschnitten mittels schwerer Stemmgeräte

Wegen des unter dem Bauwerk fließenden Verkehrs konnten unterseitig keine Spannglieder freigelegt werden. Die Spannglied-entnahme erfolgte im November 1980 nach 14-jähriger Nutzungsdauer im Bauwerk.

4.8.3.1 Zustand der Hüllrohre

Die Hüllrohre bestanden aus spiralförmig gewickelten Wellrohren mit einem Innendurchmesser von etwa 70 mm. Sie waren außen wie innen korrosionsfrei und metallisch blank (vgl. Abb. 114 und 115) und zeigten auch sonst keine Auffälligkeiten.

4.8.3.2 Verpreßmörtel und Zustand der Verpressung

Wie Abbildung 116 stellvertretend zeigt, waren die Hüllrohre vollständig verpreßt, wobei der Verpreßmörtel die typische zement-grau-grüne Färbung aufwies. Bei der Spannstahtentnahme aus dem Spannglied fanden sich keine Blasen oder Hohlräume. Der Cl-Gehalt des Verpreßmörtels lag mit 0,016 Masse-% weit unterhalb des zulässigen Wertes.

4.8.3.3 Ordnung im Hüllrohr

Ein besonderes Ordnungsprinzip innerhalb des Spanngliedes mit seinen 48 Einzeldrähten \varnothing 6 mm war nicht zu beobachten und sicher auch nicht angestrebt. Bei der Drahtentnahme fiel auf, daß die Drähte parallel neben- bzw. übereinander lagen und sich in dem ausgewerteten Abschnitt von ca. 1,3 m Länge nicht kreuzten. Infolge der streng parallelen Verlegung und der ermöglichten vollständigen Verpressung muß die Anordnung als sachgerecht eingestuft werden.

4.8.3.4 Zustand des Spannstahts

Aufgrund der in Abschnitt 4.8.3.2 geschilderten vollständigen Verpressung und des sehr geringen Cl-Gehaltes war der entnommene Spannstaht optisch nahezu einwandfrei. Die Abbildungen 117 und 118 zeigen die kaltgezogenen Spanndrähte der Güte St 150/170 (St 1470/1670), rund, glatt, \varnothing 6 mm bei etwa 1,5-facher Vergrößerung. Die Oberflächen sind grau-blau und glatt.

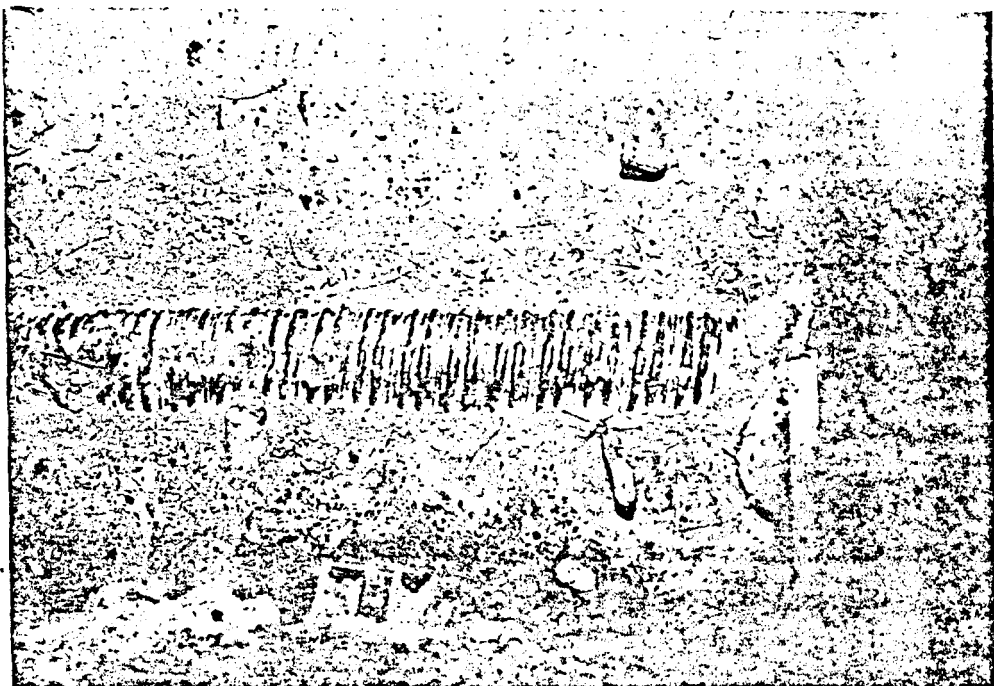


Abb. 114 Metallblanke Hüllrohraußenseite

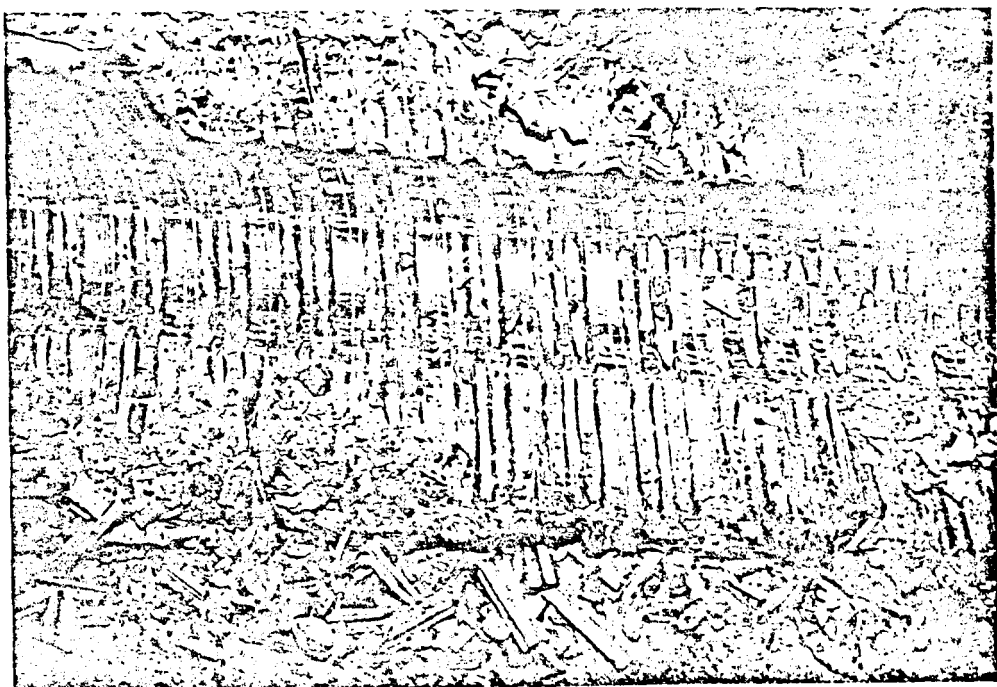


Abb. 115 Metallblanke Hüllrohrinnenseite

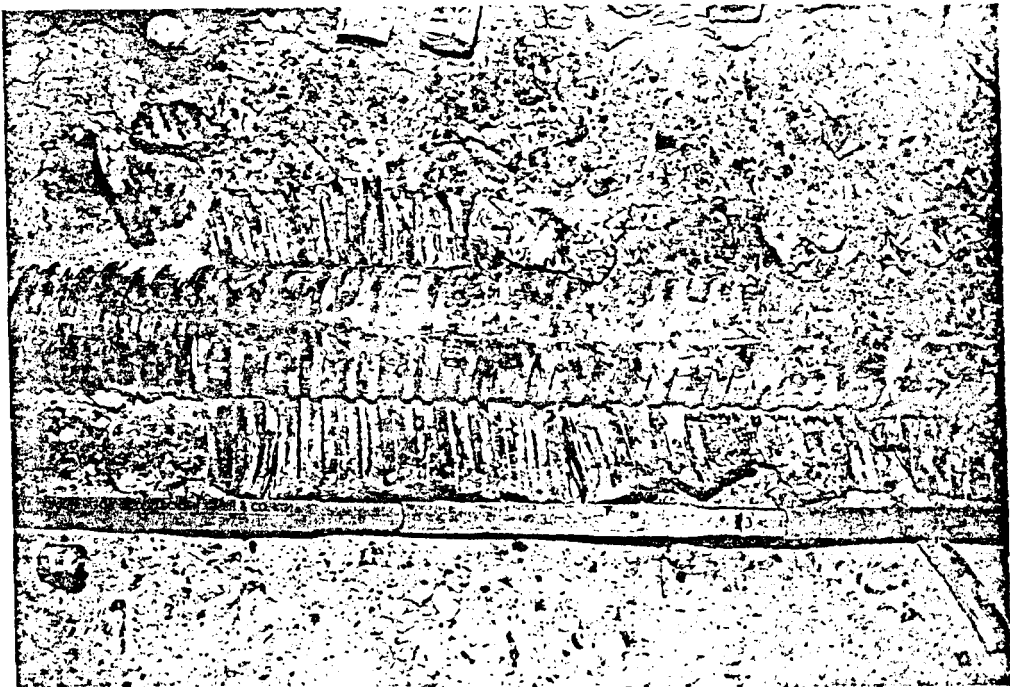


Abb. 116 Zustand der Verpressung und des Verpreßmörtels beim Öffnen des Hüllrohres

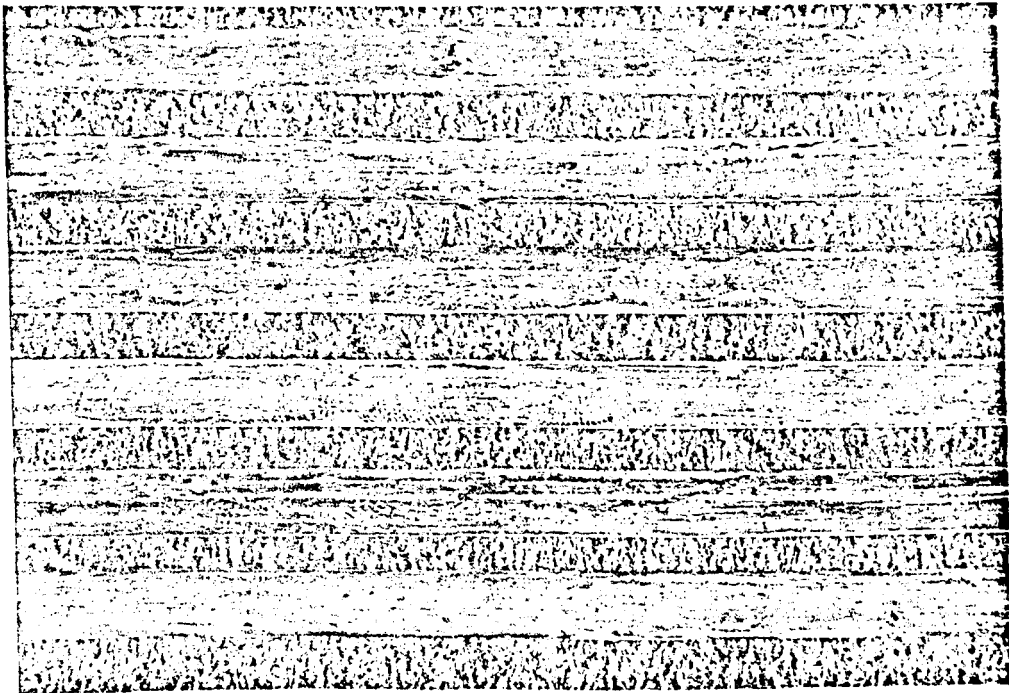


Abb. 117 Zustand von Spanndrähten nach dem Ausbau aus dem Hüllrohr bei 1,5-facher Vergrößerung

Vereinzelt sind braune Rostflecken und Linienkorrosion zu erkennen, die sich längs der Zwickel zwischen zwei sich berührenden Drähten gebildet hatten. Die Herkunft der kleinen Rostpunkte ist unklar. Zum Teil sind es die Berührungspunkte mit den Hüllrohrwellen, z.T. ist aber eine leichte Korrosion durch Schwitzwasserbefall im Hüllrohr vor dem Verpressen wahrscheinlich. Wie die fast 10-fachen Vergrößerungen der Stahloberflächen in den Abbildungen 119 und 120 zeigen, liegt keine Narbenkorrosion vor. Im Mikroskop wurde nach Ablösen der Rostprodukte mit verdünnter Zitronensäure eine mittlere Narbentiefe von nur ca. 10µ mit maximalen Werten um 20µ ausgemessen.

Die leichten Korrosionserscheinungen hatten erwartungsgemäß keinen Einfluß auf die mechanisch-technologischen Gütekennwerte. Wie die Mittelwerte aus je 5 Einzelbestimmungen der Tabelle zeigen, kann eine Abminderung der Gütekennwerte im Vergleich mit den heutigen Zulassungsbedingungen für diese Spannstahlqualität nicht festgestellt werden.

$R_{o,01}$ N/mm ²	$R_{po,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A_{10} %	A_g %	Z %	E N/mm ²
1307	1609	1808	7,5	3,4	39	2×10^5

Die Dauerschwingversuche ließen dagegen eine Differenzierung durch unterschiedliche Wöhlerkurven zwischen den nicht korrodierten und den mit Rostpunkten und Linienkorrosion versehenen Proben erkennen (vgl. Abb. 121). Bei einer Oberspannung von $\sigma_o = 0,55 R_m = 919 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich für die korrosionsfreien Proben ein $\Delta\sigma \sim 400 \text{ N/mm}^2$ und für die Proben mit leichten Korrosionsschäden ein $\Delta\sigma \sim 375 \text{ N/mm}^2$, was einer Abminderung um ca. 6 % entspricht. Erstaunlicher Weise konnte auch bei den leicht korrodierten Proben im Stereomikroskop nicht eindeutig festgestellt werden, daß der Dauerbruch von Rostflecken oder von Korrosionslinien ausging.

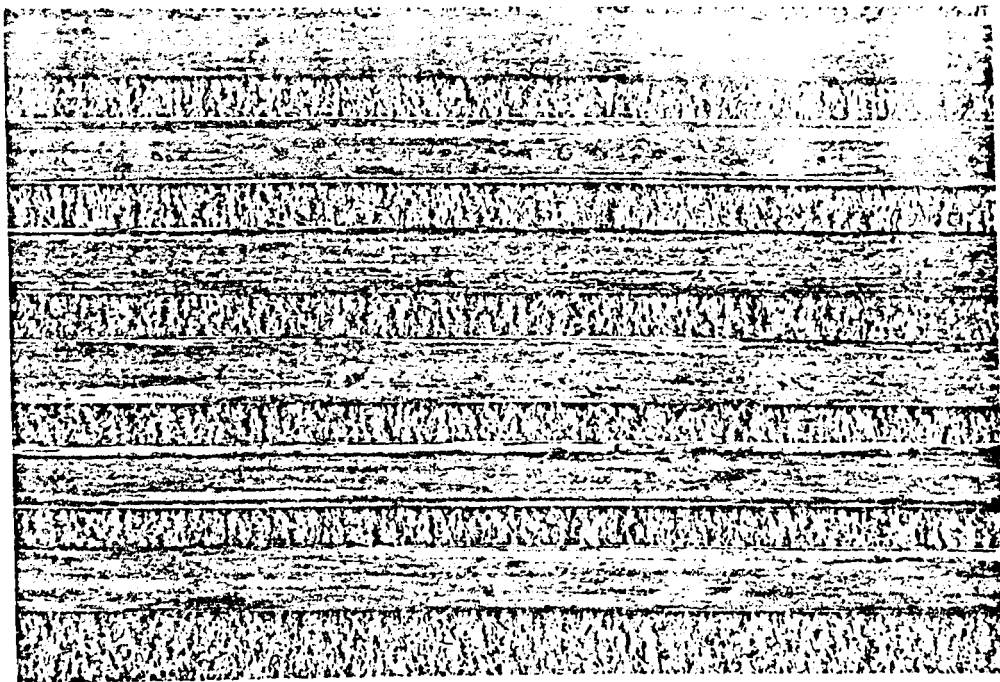


Abb. 118 Zustand von Spanndrähten nach dem Ausbau aus dem Hüllrohr bei 1,5-facher Vergrößerung, mit vereinzelt Rostpunkten und Linienkorrosion

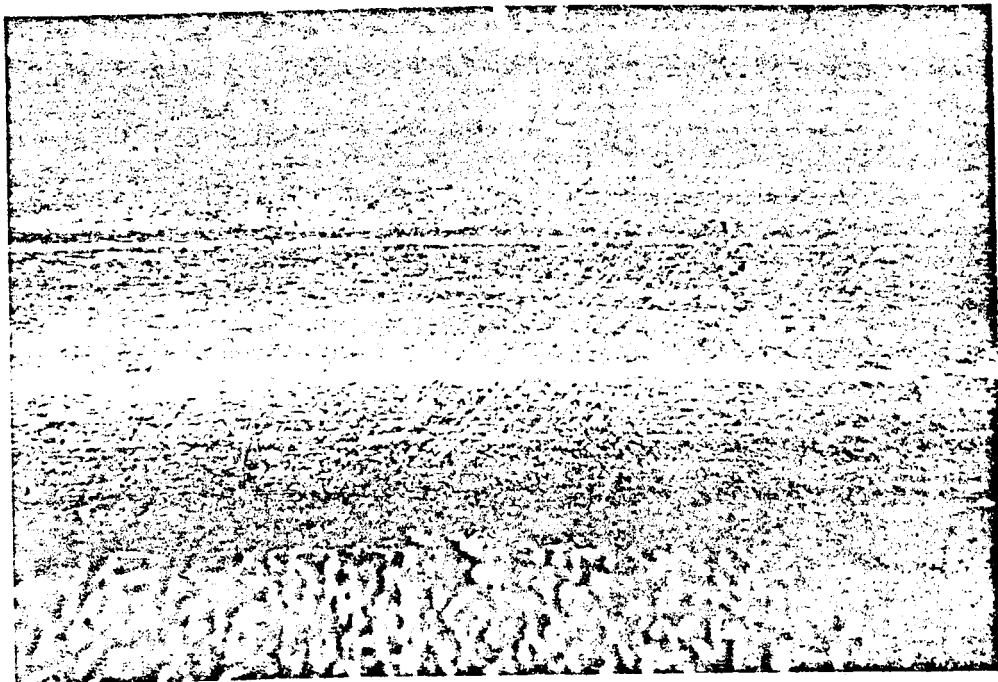


Abb. 119 Oberfläche eines Spannstahls, der als korrosionsfrei eingestuft wurde.
v ~ 10-fach

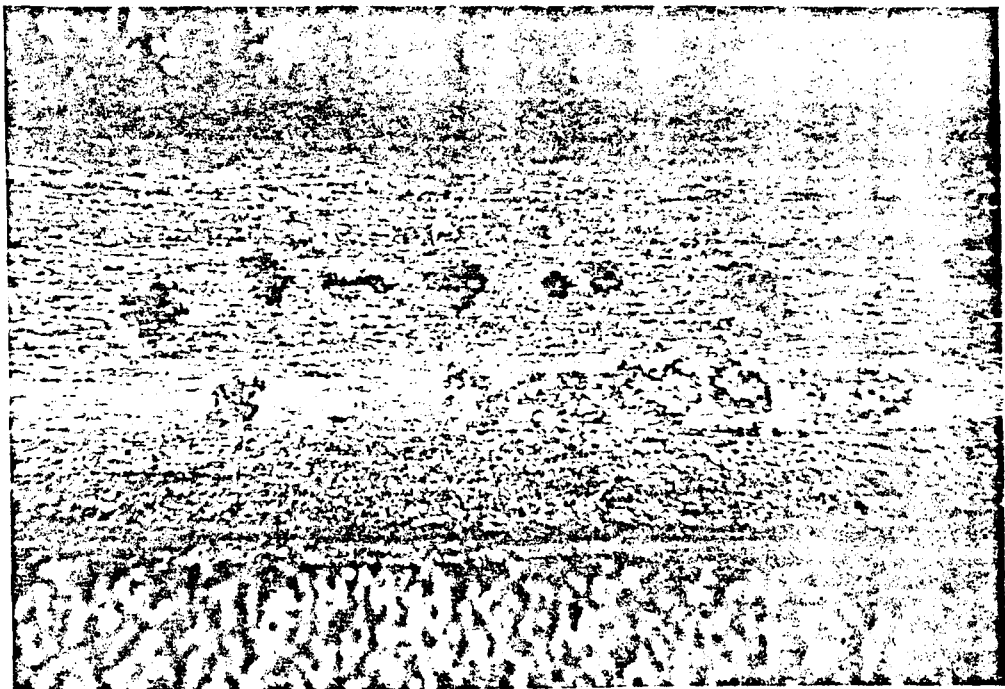


Abb. 120 Oberfläche eines Spannstahls mit Korrosionspunkten und Linienkorrosion. Die Narbentiefen betragen maximal 20µ. V~10-fach

Einen Eindruck von den Dauerbruchflächen vermitteln die Abbildungen 122 und 123. Das hier gefundene Bruchbild ist für einen kaltgezogenen Draht jedoch nicht typisch, sondern hat seine Ursache mit Sicherheit in der Herstellung (hoher Verformungsgrad beim Ziehen).

Restvorspannungsmessungen waren nicht möglich.

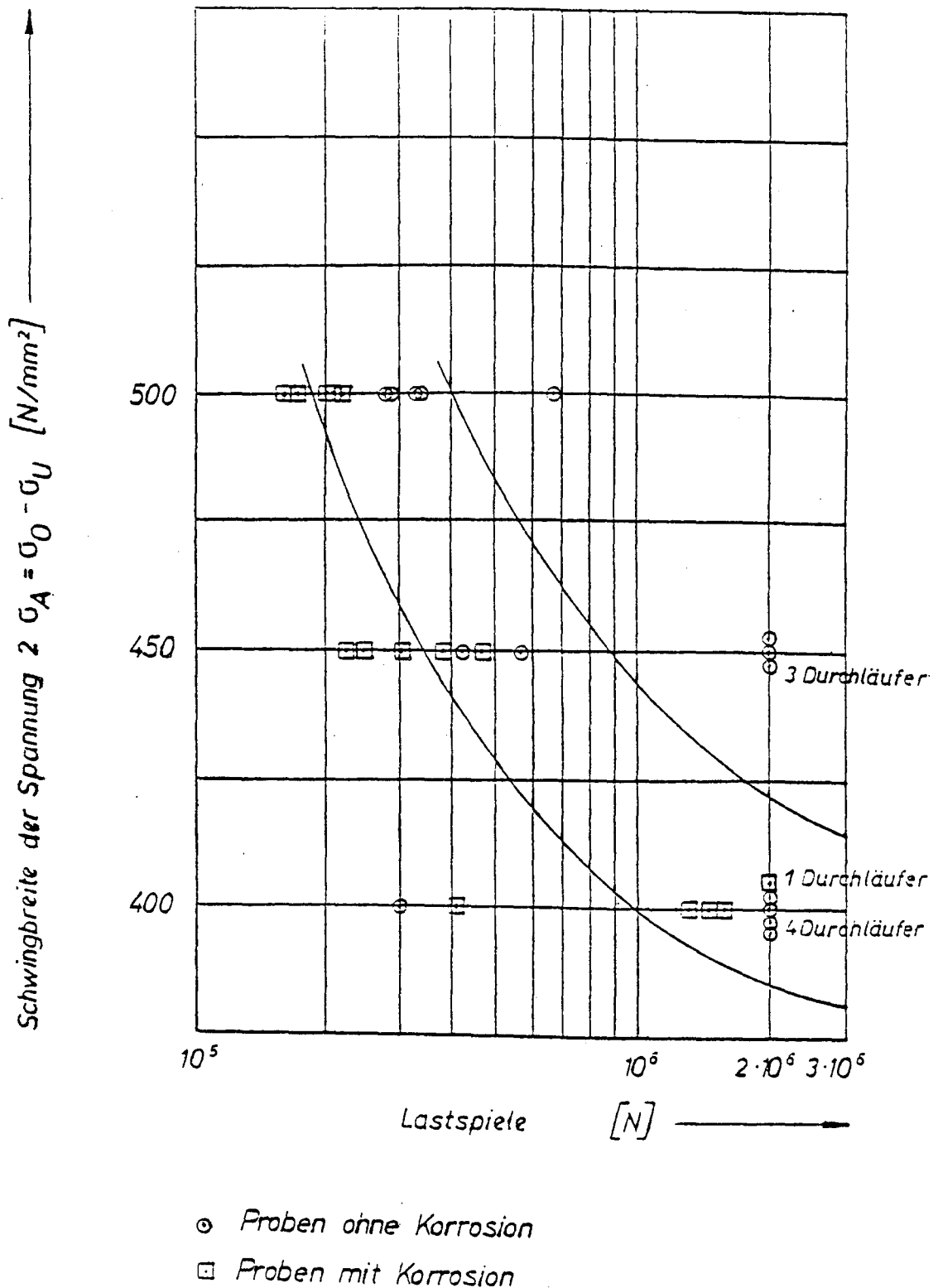


Abb. 121 Ergebnis der Dauerschwingversuche an augenscheinlich korrosionsfreien Proben und Proben mit kleinen Rostflecken oder Linienkorrosion mit einer max. Narbentiefe von 20 μ

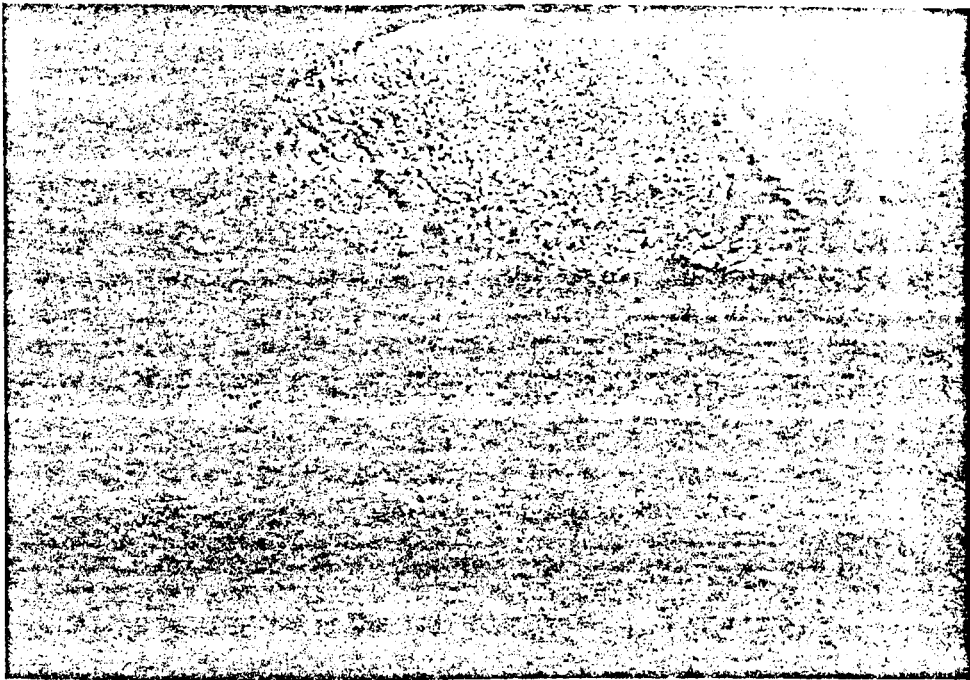


Abb. 122 Dauerbruchfläche ohne Narbe am Bruchausgang. $V \sim 15$ -fach



Abb. 123 Seitenansicht der Probe aus Abb. 122.
 $V \sim 15$ -fach

4.8.3.5 Zusammenfassende Wertung zum Langzeitverhalten der Spannstähle aus dem Brückenbauwerk 7728/0s 4.6, Überführung der Belmer-Straße über die BAB A33 in Osnabrück

Die entnommenen Spanndrähte der Güte St 150/170 (St 1470/1670), rund, glatt, Ø 6 mm, kaltgezogen, stammten aus vollständig verpressten Hüllrohren. Dementsprechend waren ihre Oberflächen augenscheinlich korrosionsfrei, von kleinen Rostflecken und leichter Linienkorrosion längs der Berührungslinien zwischen zwei Drähten abgesehen. Dieser Korrosionsangriff hatte zu Narbentiefen von i.M. 10µ, maximal 20µ geführt.

Auf die Kennwerte des statischen Zugversuches wirkten sich diese Narben nicht aus, es ergaben sich ausnahmslos bedingungs-gemäße Werte. Die Dauerschwingfestigkeit wurde durch diese sehr leichte Korrosion jedoch bereits von $\Delta\sigma \sim 400 \text{ N/mm}^2$ auf $\Delta\sigma \sim 375 \text{ N/mm}^2$ herabgesetzt, was eine Abminderung von etwa 6 % entspricht.

Die Herkunft der Korrosion kann nicht sicher geklärt werden. Für die Ausbildung derartiger Narben reicht bereits eine Schwitz-wasserkorrosion vor dem Verpressen aus. Hätten im Hüllrohr nach dem Verpressen korrosionsfördernde Bedingungen bestanden, wären während der 14-jährigen Nutzungsdauer sicher tiefere Narben entstanden.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen eines seit 1977 von der EGKS und dem IfBt, Berlin, gemeinsam geförderten Forschungsprogramms zum Thema "Korrosion von Spannstählen" wurde am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, das Forschungsvorhaben "Baustoffuntersuchungen an abzubrechenden Spannbetonbauwerken zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von Spannstählen" bearbeitet. Erkenntnisse und Informationen über das Langzeitverhalten von Spannstählen - abgesichert durch Versuchsergebnisse aus Schadensfällen oder Abbrüchen alter Spannbetonbauwerke - liegen bisher nur spärlich vor. Es wurde daher versucht, im Bearbeitungszeitraum der Forschungsaufgabe möglichst viele Spannbetonbauwerke ausfindig zu machen, die zum Abbruch und damit auch ggf. für eine Spannstahlprobenentnahme anstanden.

Insgesamt wurden 12 mögliche Bauwerke in Erfahrung gebracht, deren Abbruch für das Forschungsvorhaben voraussichtlich verwertbare Ergebnisse liefern konnten. Tatsächlich wurde dann aber nur aus 4 Bauwerken Probenmaterial entnommen. Bei den anderen Bauwerken wurden entweder die Abbrüche auf spätere Zeitpunkte verschoben oder aber eine Probenentnahme war wegen großer Entfernungen und technischer Schwierigkeiten mit den zur Verfügung gestellten Mitteln nicht möglich. In das Forschungsvorhaben wurden jedoch zur Vervollständigung und zur Absicherung auch Ergebnisse von Schadensanalysen an Spannbetonbauwerken übernommen und eingearbeitet, die im Bearbeitungszeitraum bei der forschenden Stelle anfielen und die Thematik "Langzeitverhalten von Spannstahl" betrafen. Auf diese Weise kann über den Zustand von Spannstählen aus insgesamt 8 alten Spannbetonbauwerken berichtet werden.

Ziel der Materialuntersuchungen und Auswertungen sollte es sein, jeweils die Umgebungsbedingungen der Spannstähle im Bauwerk und deren Auswirkungen auf den Korrosionszustand und die mechanisch-technologischen Gütekennwerte festzustellen. Die Untersuchungen erstreckten sich dabei auf den Spannstahl,

den Verpreßmörtel, das Hüllrohr und den umgebenden Beton, einschließlich einer Schadstoffanalyse, so daß Aussagen über das Langzeitverhalten der Spannstähle unter den jeweils vorgefundenen Umgebungsbedingungen möglich waren.

Die Ergebnisberichte zu den 8 Bauwerken wurden jeweils in die Unterabschnitte "Angaben zum Bauwerk" (Alter, Konstruktion, Grund für Abbruch bzw. Schadensanalyse etc.), "Beton" (Festigkeit, Schadstoffgehalte, Karbonatisierung etc.), "Spannglieder" (Spannverfahren, Spannstahl, Hüllrohr, Verpreßmörtel, Schadstoffgehalt, Ordnung im Hüllrohr, Restvorspannung etc.) und "Zusammenfassende Wertung" gegliedert, wobei die Untersuchungsergebnisse durch Abbildungen und Diagramme dokumentiert wurden. Je nach Umfang der möglichen Probenentnahme sind diese einzelnen Unterabschnitte mehr oder weniger umfangreich, das Hauptaugenmerk galt aber in jedem Fall dem Zustand des Spannstahls.

Das älteste untersuchte Bauwerk war 30 Jahre (Baujahr 1950) und das jüngste 15 Jahre (Baujahr 1965) alt, die mittlere Nutzungsdauer lag bei 22,5 Jahren, da sechs der acht Bauwerke zum Abbruchs- bzw. Untersuchungszeitpunkt älter als 20 Jahre waren. Die ausgewerteten Spannglieder enthielten folgende Spannstahlsorten:

St 1420/1620 (St 145/165), rund, glatt, \varnothing 5 mm (3 x),
St 1420/1620 (St 145/165), oval 20, gerippt,
St 780/1030 (St 80/105), rund, glatt, \varnothing 26 mm,
St 1320/1470 (St 135/150), rund, glatt, \varnothing 8 mm,
St 1230/1370 (St 125/140), rund, glatt, \varnothing 12,2 mm,
St 1470/1670 (St 150/170), rund, glatt, \varnothing 6 mm, kaltgezogen.

Von den Spannverfahren waren die Systeme "Freyssinet" (3x), "Monierbau", "D. u. W.", "Sawö" und "BBRV" sowie ein nicht näher bezeichnetes System vertreten, bei dem sich die Spanndrähte in Spannkammern befanden.

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- a) Ursachen von Abbrüchen alter Bauwerke oder gravierenden Schäden an langfristig genutzten Spannbetonkonstruktionen waren konstruktive Mängel, mangelhafte Bauausführung, unvollständige oder fehlende Verpressung der Hüllrohre, Einsatz ungeeigneter Baustoffe oder Zusatzmittel, nicht aber ein Versagen der Spannglieder aufgrund materialeigener Abminderung der Gütekennwerte (Alterung) des Spannstahls.
- b) Spannstähle aus einwandfrei verpreßten Hüllrohren zeigten auch nach 20 - 30-jähriger Nutzungsdauer keine Einbußen in ihren Festigkeits- und Verformungskennwerten. Die ermittelten Kennwerte derartiger Spannstähle entsprachen mindestens den Nennwerten der Zulassungsbescheide zur Bauzeit.

Eine vergleichbar sichere Aussage im Hinblick auf die Dauerschwingfestigkeit von Spannstählen aus einwandfrei verpreßten Hüllrohren ist nach derzeitigem Erkenntnisstand noch nicht möglich, da die Versuchsanzahl wesentlich kleiner ist und zudem häufig unmittelbare Vergleichswerte aus der Herstellungszeit der Stähle fehlen. Man kann jedoch davon ausgehen, daß die u.U. noch nicht auszuschließenden Abminderungen der Dauerschwingfestigkeit derartiger Spannstähle durch Alterung keine Größenordnungen erreichen, die eine mögliche Gefährdung der Bauwerke darstellen könnten.

- c) Bevorzugte Stellen oder Bereiche korrosiver Ein- und Auswirkungen waren unvollständig verpreßte Hüllrohre, Kontaktstellen zwischen Hüllrohr und Spannstahl sowie unausgefüllte Zwickel zwischen sich berührenden Spanndrähten. Sofern keine Feuchte von außen in die Hüllrohre eintreten konnte, war der korrosive Abtrag vergleichsweise gering. Narbentiefen zwischen etwa 20 - 300µ sind die Regel, Narbentiefen bis 500µ können dagegen eher als Ausnahmen angesehen werden. Die Auswirkungen solcher Narben auf die

Festigkeits- und Verformungskennwerte der Stähle bestätigten die bisherigen Erfahrungen. Es ergaben sich hier Abminderungen der Festigkeitskennwerte um maximal 3 - 5 %, der Verformungskennwerte (Bruchdehnung) jedoch schon bis um maximal 20 - 50 %, wobei 50 % als Ausnahme, dagegen 20 % und weniger als die Regel angesehen werden können. In der Tendenz schien sich auch ein Einfluß des Drahtdurchmessers anzudeuten, denn bei den vorstehend genannten Narbentiefen wurden die Festigkeits- und Verformungsabnahmen geringer, wenn der Durchmesser wuchs.

Bei der Dauerschwingfestigkeit können derartige Narben jedoch unabhängig vom Drahtdurchmesser schon zu Abnahmen bis 50 % und mehr gegenüber gleichen Stahlproben aus einwandfrei verpreßten Hüllrohren führen. Abminderungen dieser Größenordnung wurden bei Narbentiefen über 100µ häufig beobachtet. Die wenigen hier vorliegenden, gesicherten Ergebnisse von Dauerschwingversuchen deuten an, daß bei Narbentiefen zwischen 20 und 50µ die Dauerschwingfestigkeit um etwa 10 - 20 % abnimmt. Im Bereich zwischen 50 und 100µ Narbentiefe scheint die Abminderung der Dauerschwingfestigkeit dann u.U. schon auf 50 % anzusteigen. Eine weitere Steigung der Narbentiefen auf 200 oder 300µ hat dann auf die Abnahme der Dauerschwingfestigkeit offenbar nur noch einen vergleichsweise geringen Einfluß. Ein unmittelbarer, funktionaler Zusammenhang zwischen Narbentiefe und Abnahme der Dauerschwingfestigkeit kann jedoch hier nicht angegeben werden.

- d) In unverpreßten oder unvollständig verpreßten Hüllrohren mit der Möglichkeit einer Feuchtigkeitzufuhr von außen waren dagegen tiefe, den Querschnitt beeinträchtigende Korrosionsnarben vorhanden, die bei dünneren Drähten häufig, bei Spannstählen großer Durchmesser ($\varnothing > \sim 20$ mm) wegen des prozentual geringeren Einflusses der Narbentiefen auf den Querschnitt dagegen sehr selten zu Brüchen geführt hatten. Die mechanisch-technologischen Gütekennwerte - insbesondere die Dauerschwingfestigkeit - erfuhren in solchen Fällen Abminderungen, die eine Weiterverwendung der Stähle in der Regel nicht mehr zuließen.

- e) Restvorspannungsmessungen ergaben je nach Alter Spannkraftverluste zwischen 18 und 25 %, die sich aus Schwinden und Kriechen des Betons sowie Spannstahlrelaxation zusammensetzen. Wegen meßtechnisch bedingter großer Meßwertstreuungen und der Schwierigkeit, die Einflußgrößen von Beton und Spannstahl zu trennen, sind diese Ergebnisse noch wenig aussagekräftig.

Die Untersuchungen an den Spannstählen aus abgebrochenen oder geschädigten Spannbetonbauwerken haben gezeigt, daß Spannstahl grundsätzlich ein sehr dauerhafter und nicht alterungsanfälliger Baustoff ist, der bei vollständiger Umhüllung mit Verpreßmörtel seine Gütekennwerte und Qualitätsmerkmale nicht ändert.

Auch die vergleichsweise häufig gefundenen Verpreßmängel, wie verbliebene Resthohlräume, Blasen oder unausgefüllte Zwickel, stellen für sich allein noch keine unmittelbare Gefahr für Standsicherheit und Dauerhaftigkeit eines Spannbetonbauwerkes dar, trotz bereits meßbarer - und besonders hinsichtlich der Dauerschwingfestigkeit u.U. erheblicher - Abminderungen der Spannstahlgütekennwerte. Diese Mängel in der Verpressung erhöhen jedoch grundsätzlich die Empfindlichkeit des Bauwerks gegenüber korrosiven Einflußfaktoren (eindringende Feuchte, u.U. in Verbindung mit Korrosionsstimulatoren) und stellen somit ggf. eine nicht unerhebliche Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit dar.

Die hier vorgestellten Erkenntnisse zum Langzeitverhalten von Spannstählen decken sich nahezu vollständig mit den Ergebnissen des ebenfalls vom Institut für Bautechnik geförderten und hier bearbeiteten Forschungsvorhabens "Auswertung von Berichten über Abbrucharbeiten von Spannbetonbauwerken im Hinblick auf das Langzeitverhalten von Spannstählen" (Az.: IV/1-5-133/77). Sie erfordern daher im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Spannbetonbauwerken, daß bei der Entwicklung neuer Spanndrähte nicht korrosionsempfindlichere Werkstoffe entstehen, vor allem aber eine Weiterentwicklung der Spannverfahren. In Zukunft sollten daher Spannverfahren verbessert, entwickelt und bevorzugt werden, die beispielsweise aufgrund von Hüllrohrquerschnitt und Spanndrahtfüllung ein wesentlich fehlstellenfreieres Verpreßergebnis

als bisher ermöglichen. Von gleicher Bedeutung ist aber auch, daß den Verpreßarbeiten grundsätzlich ein höherer Stellenwert und damit noch größere Sorgfalt im Bauablauf eingeräumt wird.

Abschließend danken die Autoren dem Institut für Bautechnik für die Förderung des Forschungsvorhabens und den beteiligten Landesbauverwaltungen und Straßenbauämtern für die in jeder Hinsicht vorbildliche und engagierte Unterstützung bei Probenentnahmen.